



TUGAS AKHIR TF141581

**ANALISA PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA HIDRO-KINETIK PADA KANAL *WATER
COOLER* DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP
PAITON DENGAN MATLAB SIMULINK**

FARIDHUL IKHSAN

NRP. 2412 100 036

Dosen Pembimbing
Harsono Hadi, Ph.D.
Ir. Roekmono, M.T.

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT TF141581

**MODELLING ANALYSIS OF HYDROKINETIC
POWER PLANT OF WATER COOLER'S
CHANNEL IN VAPOR POWER PLANT PAITON
USING MATLAB SIMULINK**

FARIDHUL IKHSAN
NRP. 2412 100 036

Supervisor
Harsono Hadi, Ph.D.
Ir. Roekmono, M.T.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA HIDRO-KINETIK PADA KANAL *WATER*
COOLER DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP
PAITON DENGAN MATLAB SIMULINK**

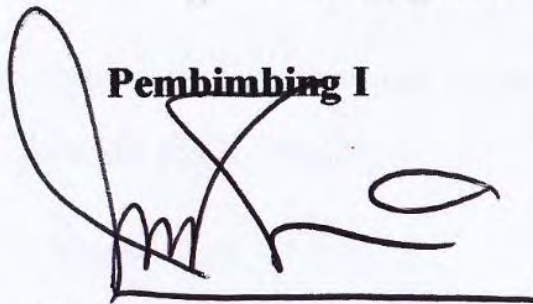
TUGAS AKHIR

Oleh:

**FARIDHUL IKHSAN
NRP. 2412 100 036**

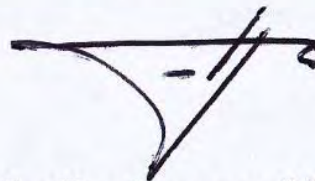
**Surabaya, 6 Juni 2016
Mengetahui/Menyetujui**

Pembimbing I



Harsono Hadi, Ph.D.
NIP. 196001191986111001

Pembimbing II



Ir. Roekmono, M.T.
NIP. 195809081986011001

**Ketua Jurusan
Teknik Fisika, FTI – ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 197809022003121002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIDRO-KINETIK PADA KANAL *WATER COOLER* DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PAITON DENGAN MATLAB SIMULINK

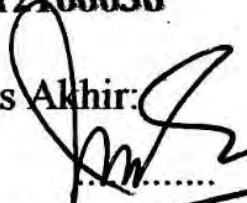
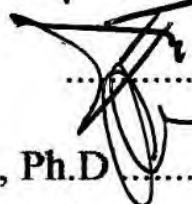
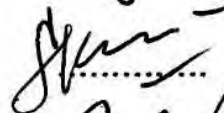
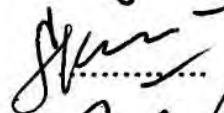

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Bidang Studi Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**FARIDHUL IKHSAN
NRP 2412100036**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. Harsono Hadi, Ph.D |  | (Pembimbing I) |
| 2. Ir. Roekmono, M.T. |  | (Pembimbing II) |
| 3. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D |  | (Ketua Tim Penguji) |
| 4. Ir. Sarwono, M.M. |  | (Penguji I) |
| 5. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc. |  | (Penguji II) |

**SURABAYA,
JULI 2016**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISA PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIDRO-KINETIK PADA KANAL WATER COOLER DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PAITON DENGAN MATLAB SIMULINK

Nama : Faridhul Ikhsan
NRP : 2412 100 036
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Harsono Hadi, Ph.D.
Ir. Roekmono, M.T.

Abstrak

Sebagian besar air pendingin pada PLTU digunakan untuk mengkondensasikan uap yang keluar dari turbin. Air pendingin diambil dari laut kemudian dialirkan kembali ke laut melalui suatu kanal water cooler setelah digunakan. Belum adanya pemanfaatan air pendingin pada kanal water cooler ini memunculkan gagasan untuk memanfaatkannya sebagai PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hidro-kinetik). Data dari lapangan menunjukkan aliran air rata-rata pada kanal water cooler adalah sebesar 3 m/detik. Kondisi tersebut dapat dimanfaatkan dengan pemasangan komponen – komponen Pembangkit Listrik Tenaga Hidro-kinetik seperti turbin, generator induksi, DC-AC inverter dan jala-jala (grid). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui desain optimal sistem PLTH menggunakan software pemodelan Matlab Simulink. Parameter desain yang mempengaruhi sistem ini salah satunya adalah pitch angle pada turbin hidro-kinetik. Penelitian diawali dengan pemodelan turbin hidro-kinetik, generator induksi, DC-AC inverter dan jala-jala (grid). Kemudian dilakukan simulasi pemodelan sistem secara keseluruhan. Diperoleh hasil, pitch angle optimal adalah 0° dengan torsi mekanik 2741,5 Nm, daya keluaran 132,5 kW, tegangan tiga fasa 325,5V dengan frekuensi 50 Hz, arus listrik 900 A, rotasi rotor pada generator 1520 rpm dan torsi elektrik 2703 Nm. DC-AC inverter menghasilkan tegangan tiga fasa 400 V dengan frekuensi 50 Hz, arus 134 A dan modulation index 1,04.

Kata Kunci: Kanal water cooler, turbin hidro-kinetik, generator induksi, DC-AC inverter, pitch angle.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

MODELING ANALYSIS OF HYDROKINETYC POWER PLANT ON WATER COOLER'S CHANNEL OF STEAM POWER PLANT PAITON USING MATLAB SIMULINK

Name : Faridhul Ikhsan
NRP : 2412 100 036
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : Harsono Hadi, Ph.D.
Ir. Roekmono, M.T.

Abstract

Most of the power plant cooling water is used to condense the steam coming from the turbine. Cooling water drawn from the sea and then channeled back into the sea via a canal water cooler after use. The absence of the use of cooling water in the canal's water cooler up with the idea to use it as PLTH (Hydrokinetic Power Plant). Data from the field indicate an average water flow in the canal water cooler is 3 m /second. Such conditions can be used with the installation of components - hydrokinetic power plant components such as turbine, induction generator, DC-AC inverter and grid connection. The purpose of this study was to determine the optimal design PLTH system using Matlab Simulink modeling software. Design parameters that affect this system one of which is the pitch angle at a hydrokinetic turbine. The study begins with modeling hydrokinetic turbine, induction generator, DC-AC inverter and grid connection. Then simulation modeling of the overall system. Obtained results, the optimum pitch angle is 0° with torque mechanic of 2741.5 Nm, the power output of 132.5 kW, three-phase voltage 325,5V with a frequency of 50 Hz, an electric current of 900 A, the rotation of the generator rotor at 1520 rpm and electric torque of 2703 Nm, DC-AC inverter produces three-phase voltage of 400 V with a frequency of 50 Hz, 134 A current and a modulation index of 1.04.

Keywords: Canal water cooler, hydrokinetic turbine, induction generator, DC- AC inverter, pitch angle.

“This page is intentionally leftblank”

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, puji syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, serta limpahan kesehatan dan petunjuk bagi penulis. Shalawat serta salam juga senantiasa penulis curahkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir beserta pembuatan laporan yang berjudul:

“ANALISA PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIDRO-KINETIK PADA KANAL WATER COOLER DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PAITON DENGAN MATLAB SIMULINK”.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan bagi seorang mahasiswa dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dalam kesempatan kali ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini, khususnya kepada :

1. Kedua orangtua penulis yang tiada hentinya memberikan doa dan dukungan baik secara moril maupun materiil sedari penulis kecil hingga menjadi sebesar ini.
2. Bapak Harsono Hadi, Ph.D. dan Bapak Ir. Roekmono, M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan arahan dan pencerahan kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc. selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Fisika FTI ITS.
4. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. atas inspirasi dan motivasi yang diberikan kepada penulis.
5. Bapak Agus Muhamad Hatta S.T., M.Si., Ph.D. selaku ketua Jurusan Teknik Fisika, FTI – ITS.

6. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian atas segala saran dan kemudahan dalam mengembangkan kemampuan di laboratorium.
7. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Fisika FTI ITS, khususnya dosen bidang minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan atas segala pemberian ilmu yang tulus sehingga penulis dapat menyelesaikan kuliah sampai tugas akhir ini.
8. Teman-teman asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan atas segala keceriaan dan kebersamaan selama ini.
9. Teman – teman sesama pejuang tugas akhir atas kebersamaan dan solidaritas dalam memperjuangkan tugas akhir ini hingga selesai.
10. Seluruh keluarga dari penulis yang telah memberikan semangat dan doa.
11. Teman-teman angkatan 2012, kakak – kakak angkatan 2009, 2010, dan 2011 serta adik-adik angkatan 2013 dan 2014 atas segala kebersamaan selama penulis berkuliah.

Penulis sangat menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan untuk menyempurnakan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, 10 Juni 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	v
ABSTRAK	ix
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR NOTASI	xxiii

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Kondensor	5
2.2 <i>Water Cooler's Channels</i>	7
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Hidro-kinetik.....	8
2.4 Turbin Hidro-kinetik	9
2.5 <i>Gearbox</i>	13
2.6 Generator Induksi.....	14
2.7 <i>Pulse Width Modulation Inverter</i>	16
2.8 <i>Three-Phase Transformer</i>	20
2.9 Jala-jala (<i>Grid</i>)	24

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian	25
3.2 Studi Literatur	26

3.3	Pengambilan Data	26
3.4	Diagram Blok Sistem dan Pemodelan.....	27
3.5	Perhitungan Efisiensi Sistem PLTH.....	39
3.6	Perbandingan Unjuk Kerja Turbin Hidro-kinetik.....	39
3.7	Analisis Hasil Pemodelan	40

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1	Torsi Turbin Hidro-kinetik pada <i>Pitch Angle</i> 0° pada Kecepatan Air 0-3m/s.....	41
4.2	Torsi Turbin Hidro-kinetik pada <i>Pitch Angle</i> 5 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/s	42
4.3	Torsi Turbin Hidro-kinetik pada <i>Pitch Angle</i> 10 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/s	43
4.4	Torsi Turbin Hidro-kinetik pada <i>Pitch Angle</i> 15 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/s	43
4.5	Torsi Turbin Hidro-kinetik pada <i>Pitch Angle</i> 20 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/s	44
4.6	Daya, Tegangan dan Arus Generator Induksi pada Turbin Hidro-kinetik dengan <i>Pitch Angle</i> 0 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/s	45
4.7	<i>Electromagnetic Torque</i> dan Kecepatan Rotasi Generator Induksi pada Turbin Hidro-kinetik dengan <i>Pitch Angle</i> 0 Derajat pada Kecepatan Air 0-3 m/s.....	47
4.8	Tegangan DC, Tegangan Inverter dan Modulation Indeks pada DC/AC Inverter.....	48
4.9	Arus pada Diode 1-3 dan IGBT 1-2 pada DC/AC Inverter	49
4.10	Tegangan Tiga Fasa (V_{ABC}) dan Arus Tiga Fasa (I_{ABC}) pada DC/AC Inverter.....	49
4.11	Tegangan Output Inverter (V_{AB}) dan Tegangan pada Jala-jala (Grid)	50

BAB V

PENUTUP

5.1	Kesimpulan	53
-----	------------------	----

5.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	55

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Siklus sederhana PLTU	5
Gambar 2.2 <i>Air cooled condenser</i>	6
Gambar 2.3 <i>Water Cooled Condenser</i>	6
Gambar 2.4 <i>Evaporate Condenser</i>	7
Gambar 2.5 Skema <i>water cooler's channel</i>	8
Gambar 2.6 Skema PLTH	9
Gambar 2.7 Turbin <i>horyzontal axis</i>	11
Gambar 2.8 Turbin <i>vertical axis</i>	12
Gambar 2.9 <i>Gearbox</i>	13
Gambar 2.10 <i>Winding</i> pada generator induksi	14
Gambar 2.11 Rangkaian <i>single-phase</i> PWM dengan IGBTs	18
Gambar 2.12 Komparator pada transistor.....	18
Gambar 2.13 Tegangan referensi komparator	19
Gambar 2.14 Output rangkaian PWM dengan sinusoidal control voltage.....	19
Gambar 2.15 Skema Transformer dengan sambungan wye-wye	21
Gambar 2.16 Skema Transformer dengan sambungan wye-delta	22
Gambar 2.17 Skema Transformer dengan sambungan delta-wye	23
Gambar 2.18 Skema Transformer dengan sambungan delta-delta	24
Gambar 2.19 Diagram sederhana <i>electrical grid</i>	24
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	25
Gambar 3.2 <i>Water cooler's channel</i> PLTU.....	26
Gambar 3.3 Diagram blok sistem PLTH	27
Gambar 3.4 Pemodelan keseluruhan sistem PLTH	28
Gambar 3.5 Pemodelan sub-sistem trubin hidro-kinetik	30
Gambar 3.6 Pemodelan sub-sistem generator induksi.....	32
Gambar 3.7 Pemodelan sub-sistem DC-AC inverter.....	35
Gambar 3.8 Pemodelan sub-sistem jala-jala (<i>grid</i>)	37
Gambar 3.9 Perbandingan unjuk-kerja turbin hidro-kinetik.....	40

Gambar 4.1 Torsi turbin hidro-kinetik pada <i>pitch angle</i> 0 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik	41
Gambar 4.2 Torsi turbin hidro-kinetik pada <i>pitch angle</i> 5 Derajat pada kecepatan air 0-3m/detik.....	42
Gambar 4.3 Torsi turbin hidro-kinetik pada <i>pitch angle</i> 10 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik	43
Gambar 4.4 Torsi turbin hidro-kinetik pada <i>pitch angle</i> 15 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik	44
Gambar 4.5 Torsi turbin hidro-kinetik pada <i>pitch angle</i> 20 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik	45
Gambar 4.6 Daya, tegangan dan arus generator induksi pada turbin hidro-kinetik dengan <i>pitch angle</i> 0 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik	46
Gambar 4.7 <i>Electromagnetic torque</i> dan kecepatan rotasi generator induksi pada turbin hidro-kinetik dengan <i>pitch angle</i> 0 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik.	47
Gambar 4.8 Tegangan DC, tegangan inverter dan modulation indeks pada DC-AC inverter.....	48
Gambar 4.9 Arus pada diode 1-3 dan IGBT 1-2 pada DC-AC inverter.....	49
Gambar 4.10 Tegangan tiga fasa (V_{ABC}) dan arus tiga fasa (I_{ABC}) pada DC-AC inverter	50
Gambar 4.11 Tegangan <i>output</i> inverter (V_{AB}) dan tegangan pada jala-jala (<i>grid</i>)	50

DAFTAR TABEL

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR NOTASI

v	=	kecepatan air (m/s)
g	=	percepatan gravitasi (m/s ²)
ρ	=	densitas air (kg/m ³)
P	=	daya mekanik turbin (W)
D	=	diameter turbin (m)
τ	=	torsi turbin/torsi propeller (Nm)
ω_m	=	kecepatan angular rotor generator (rad/s)
ω_r	=	kecepatan elektrik angular rotor generator (rad/s)
θ_m	=	posisi angular rotor generator (rad)
T_e	=	torsi elektrik (Nm)
T_m	=	torsi mekanik (Nm)
J	=	koefisien inersia rotor dan beban
H	=	konstanta inersia rotor dan beban
F	=	koefisien gesek beban rotor dan beban
n	=	<i>gear ratio</i>
ω_s	=	<i>synchronous speed</i> (rad/s)
φ_{qs}	=	fluks magnetik stator sumbu q (Wb)
φ_{ds}	=	fluks magnetik stator sumbu d (Wb)
φ_{qr}	=	fluks magnetik rotor sumbu q (Wb)
φ_{dr}	=	fluks magnetik rotor sumbu d (Wb)
R_s	=	resistansi stator (Ω)
R_r	=	resistansi rotor (Ω)
I_{qs}	=	arus stator sumbu q (A)
I_{ds}	=	arus stator sumbu d (A)
I_{qr}	=	arus rotor sumbu q (A)
I_{dr}	=	arus rotor sumbu d (A)
L_{ls}	=	kebocoran induktansi stator (Wb/A)
L_{lr}	=	kebocoran induktansi rotor (Wb/A)
L_m	=	induktansi magnetik (Wb/A)
L_s	=	total induktansi stator (Wb/A)
L_r	=	total induktansi rotor (Wb/A)
V_{qs}	=	tegangan stator sumbu q (V)

V_d	=	tegangan stator sumbu d (V)
V_{qr}	=	tegangan rotor sumbu q (V)
V_{dr}	=	tegangan rotor sumbu d (V)
s	=	slip rotor
P_{active}	=	daya aktif generator (W)
P_{react}	=	daya reactive generator (W)
β	=	pitch angle ($^{\circ}$)
p	=	jumlah pasangan pole generator
Z_1	=	jumlah <i>teeth</i> gear input
Z_2	=	jumlah <i>teeth</i> gear output
N_1	=	kecepatan putaran gear input
N_2	=	kecepatan putaran gear output
$V_p(t)$	=	tegangan primer terhadap waktu (V)
$V_s(t)$	=	tegangan sekunder terhadap waktu (V)
N_p	=	jumlah lilitan primer
N_s	=	jumlah lilitan sekunder
a	=	rasio tegangan
$i_p(t)$	=	arus primer terhadap waktu (A)
$i_s(t)$	=	arus sekunder terhadap waktu (A)
P_{out}	=	daya keluaran transformator (W)
P_{in}	=	daya masukan transformator (W)
V_p	=	tegangan primer (V)
I_p	=	arus primer (A)
θ_p	=	sudut antara tegangan dan arus primer (rad)
θ_s	=	sudut antara tegangan dan arus sekunder (rad)
Q_{in}	=	daya reaktif masukan (W)
Q_{out}	=	daya reaktif keluaran (W)
S_{in}	=	daya semu masukan (W)
S_{out}	=	daya semu keluaran (W)
Z_L	=	impedansi (Ω)
$V_{\phi P}$	=	tegangan primer setiap fasa (V)
$V_{\phi S}$	=	tegangan sekunder setiap fasa (V)
V_T	=	tegangan suhu dioda (V)
V_D	=	tegangan dioda (V)

I_S	=	arus saturasi dioda (A)
n	=	faktor keidealan diode
m	=	<i>modulation index</i>
V_{ref}	=	amplitudo dari sinyal referensi
V_{car}	=	amplitudo dari sinyal pembawa

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bagian terpenting dalam proses kondensasi uap air dari suatu PLTU adalah *Cooling Tower*. *Cooling tower* berfungsi membuang panas air pendingin yang keluar dari kondenser kemudian diumpankan kembali pada kondenser. Sebagian besar air digunakan untuk mengkondensasikan uap yang keluar dari turbin. Sebagai asumsi, untuk kenaikan 10 derajat celcius pada pembangkit listrik berkapasitas 400 mW dibutuhkan sekitar 200 ribu galon per menit (gpm) atau sekitar 12.7 ribu liter per detik (l/dt) berupa air pendingin [1]. Sedangkan kapasitas PLTU Paiton adalah 800 mW dan setiap tahun membangkitkan listrik rata-rata 5.606,18 gWh [2]. Pada umumnya, air pendingin tersebut diambil dari sumber air yang sangat berlimpah, misalnya laut, danau atau sebuah sungai besar yang dialirkan melalui suatu kanal *water cooler* yang kemudian dikembalikan lagi ke sumber asalnya [1]. Jika dilihat dari besarnya kebutuhan air pendingin pada suatu PLTU Paiton maka, terdapat potensi untuk pembangunan pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan memanfaatkan aliran kanal *water cooler*. Pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dapat menghasilkan energi listrik dengan memanfaatkan gelombang laut, arus pasang surut, aliran sungai, arus laut dan panas dari laut [3].

Terdapat dua jenis pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik, yaitu berdasarkan arus dan berdasarkan ombak. Pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik berdasarkan arus dibagi menjadi empat kategori, yaitu arus sungai, arus tidal, arus laut, irigasi dan kanal buatan. Generasi terbaru pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dapat menghasilkan listrik dengan memanfaatkan aliran air tanpa memberikan dampak buruk terhadap lingkungan [3]. Kelebihan dari energi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik antara lain mudah diprediksi, dapat diramal, ramah lingkungan, tidak mencemari air, tidak menghasilkan

emisi dan kebisingan [4]. Dengan menggunakan turbin hidro-kinetik 12 juta GW/h dapat dihasilkan pada sungai besar [5]. Turbin hidro-kinetik dirancang untuk bekerja pada aliran air dengan kecepatan 2-4m/ detik sedangkan turbin angin berkisar antara 11-13 m/detik [6]. Namun air mempunyai massa jenis 835 kali lebih besar daripada angin. Untuk arus laut sendiri diperkirakan dapat menghasilkan listrik hingga 5000 gW [7]. Sehingga dengan mempertimbangkan beberapa fakta tersebut, pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik terlihat sangat menjanjikan dan menghasilkan energi yang lebih besar dibandingkan angin [8].

Pemodelan dan simulasi pada suatu sistem pembangkit listrik merupakan hal yang penting sebelum sistem tersebut direalisasikan. Melalui pemodelan dan simulasi dapat dilakukan penelitian mengenai karakteristik dinamik dari suatu pembangkit listrik [9]. Dengan menggunakan Matlab Simulink dapat dibuat suatu model sistem pembangkit listrik dengan fleksibilitas yang tinggi dan mengikuti model yang dibutuhkan [10]. Matlab Simulink adalah software yang handal dan dapat digunakan untuk mempelajari sistem dinamik dan non linier. Dengan Matlab Simulink, simulasi model dapat dibangun secara sistematis dimulai dari *sub-model* sederhana. Kelebihan utama Matlab Simulink dibandingkan dengan software pemrograman lainnya adalah pada proses kompilasi kode program, simulasi model dapat dibangun secara sistematis menggunakan diagram blok fungsi sederhana. Matlab Simulink dapat digunakan untuk mempelajari dinamika model dari suatu sistem pembangkit listrik tenaga air, termasuk perilaku dinamik generator listrik yang bergantung pada turbin air yang juga sangat penting untuk dipelajari [11].

Pada pengerjaan tugas akhir ini akan dilakukan analisa pemodelan pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan memanfaatkan energi yang berasal dari aliran air pada kanal *water cooler* di PLTU Paiton dengan menggunakan *software* Matlab Simulink.

1.2 Perumusan masalah

Dari paparan latar belakang pada penelitian ini, maka permasalahan yang muncul antara lain:

- a. Bagaimana pengaruh variasi *pitch angle* terhadap torsi yang dihasilkan oleh turbin hidro-kinetik pada kecepatan air 0-3 m/detik?
- b. Bagaimana karakteristik daya aktif, daya reaktif, tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator induksi ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik?
- c. Bagaimana karakteristik torsi elektrik dan rpm generator induksi ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik?
- d. Bagaimana karakteristik tegangan DC, tegangan *inverter* dan *modulation index* pada DC-AC *inverter* ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik?
- e. Bagaimana karakteristik tegangan tiga fasa dan arus tiga fasa yang dihasilkan oleh DC-AC *inverter* ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik?
- f. Bagaimana karakteristik arus pada diode 1 dan 3 serta arus pada *Implement Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) pada rangkaian DC-AC *inverter* ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik?
- g. Bagaimana karakterisitk tegangan pada *load* dan tegangan pada jala-jala (*grid*) ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik?

1.3 Batasan masalah

Adapun batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini antara lain:

- a. Air pada kanal *water cooler* dianggap air biasa dengan densitas 1000 kg/m^3 .
- b. Penelitian berfokus pada komponen turbin, generator, DC-AC *inverter* dan jala-jala (*grid*).
- c. Penelitian tidak ditekankan pada konstruksi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hidro-kinetik.

- d. Arah datangnya air tegak lurus terhadap permukaan turbin Hidro-kinetik.
- e. Kecepatan air pada kanal *water cooler* adalah 0-3 m/detik.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian kali ini antara lain:

- a. Mengetahui pengaruh *pitch angle* terhadap torsi turbin hidro-kinetik.
- b. Mengetahui karakteristik daya aktif, daya reaktif, tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator induksi ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik.
- c. Mengetahui karakteristik torsi elektrik dan rpm generator induksi ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik.
- d. Mengetahui karakteristik tegangan DC, tegangan *inverter* dan *modulation index* pada DC-AC *inverter* ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik.
- e. Mengetahui karakteristik tegangan tiga fasa dan arus tiga fasa yang dihasilkan oleh DC-AC *inverter* ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik.
- f. Mengetahui karakteristik arus pada diode 1 dan 3 serta arus pada *Implement Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) pada rangkaian DC-AC *inverter* ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik.
- g. Mengetahui karakteristik tegangan pada *load* dan tegangan pada jala-jala (*grid*) ketika turbin dikenai air dengan kecepatan 0-3 m/detik.

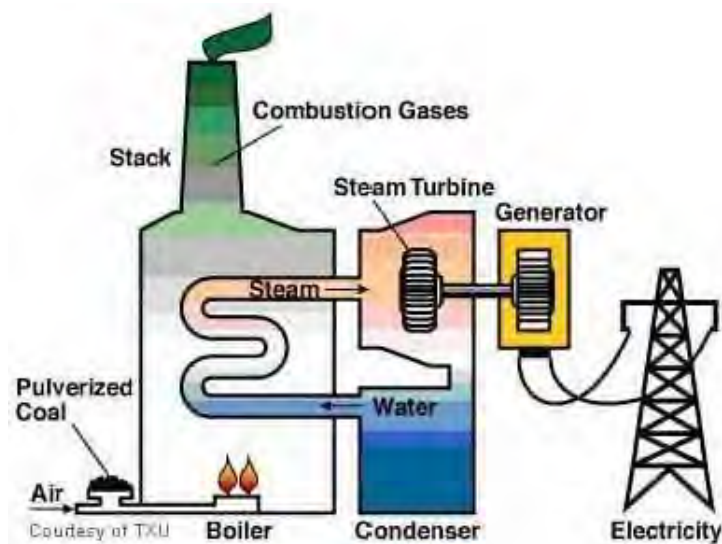
1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian dalam tugas akhir ini adalah untuk mengetahui seberapa besar torsi yang dihasilkan dari turbin hidro-kinetik, karakteristik generator induksi, karakteristik DC-AC *inverter* dan karakteristik tegangan jala-jala (*grid*) pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hidro-kinetik.

BAB II TEORI PENUNJANG

2.1 Kondensor

Kondensor merupakan alat penukar panas yang berfungsi untuk mengkondensasikan suatu fluida dari bentuk gas menjadi bentuk cair dengan cara menurunkan temperaturnya. Pada kondisi aktual, fluida tersebut menghasilkan kalor laten kemudian di-*transfer*-kan ke pendingin kondesat. Pada umumnya kondensor digunakan pada sistem pengkondisian udara, industri proses kimia, PLTU ataupun sistem penukar panas lainnya. Sebagian besar kondensor menggunakan air atau udara di sekitarnya sebagai pendingin. Pada PLTU, kondensor berfungsi untuk mengkondensasikan uap keluaran dari turbin dan merubahnya menjadi bentuk cair. Air yang telah berubah fasa menjadi cair kemudian diumpankan kembali pada *steam generator* atau *boiler* pada PLTU [1].



Gambar 2.1 Siklus sederhana PLTU

Berdasarkan jenis media pendingin yang digunakan, kondensor dibagi menjadi beberapa jenis, antara lain [2]:

- a. *Air Cooled Condenser*

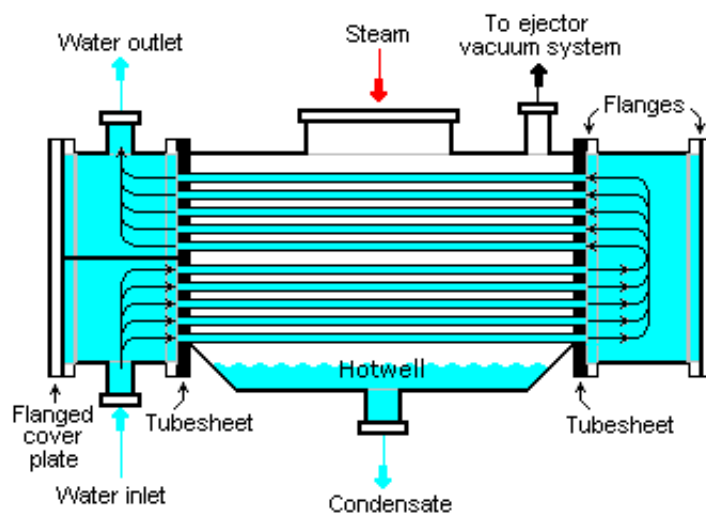
Kondesor yang memanfaatkan udara sebagai pendingin kondensatnya.



Gambar 2.2 *Air cooled condenser*

b. Water Cooled Condenser

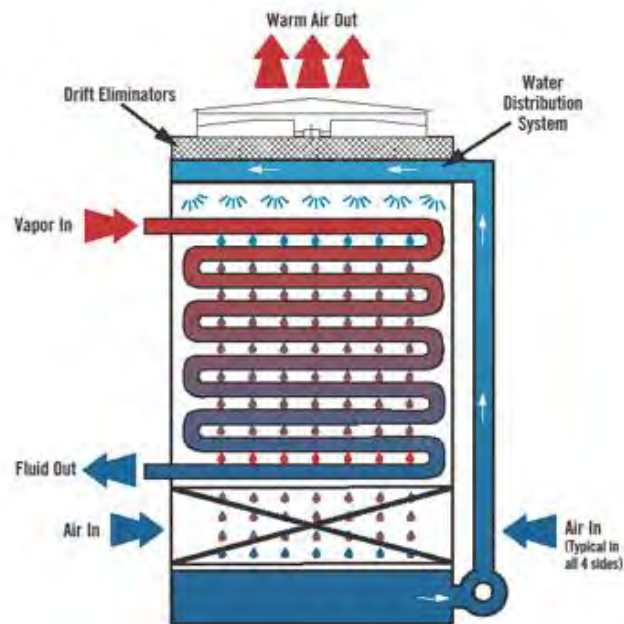
Kondensor yang memanfaatkan cairan sebagai pendingin kondensatnya. Beberapa macam cairan yang dimanfaatkan sebagai media pendingin kondensat, yaitu: air, freon, dan ammonia. Pada umumnya kondensor yang sering digunakan pada PLTU adalah jenis *shell and tube condenser*. Air pendingin diambil dari sumber air di sekitar PLTU, misal: danau, sungai, dan laut.



Gambar 2.3 *Water Cooled Condenser*

c. *Evaporative Condenser*

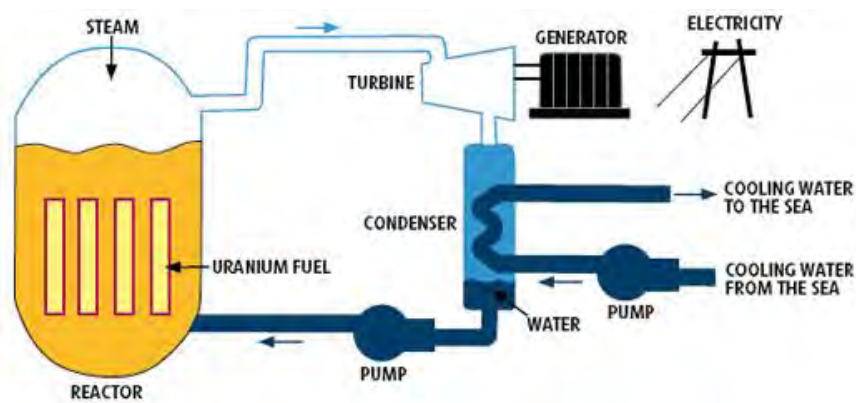
Kondensor yang memanfaatkan kombinasi udara dan air sebagai media pendinginnya.



Gambar 2.4 *Evaporative Condenser*

2.2 *Water Cooler's Channels*

Air pendingin yang digunakan kondensor PLTU pada umumnya menggunakan air laut yang sebelumnya melewati beberapa proses, antara lain : *bar screen*, *traveling screen*, *screen wash pump*, *cooling water pump (CWP)*, setelah itu ditampung di *box culvert*, kemudian dimanfaatkan sebagai media pendingin pada kondensor. Setelah keluar dari kondensor, air pendingin tersebut akan menuju saluran yang disebut *discharge channel*. Saluran ini berfungsi untuk mengalirkan air pendingin menuju suatu kanal utama atau *water cooler's channel* sebelum dikembalikan lagi ke laut [3]. Berikut adalah Skema dari *water cooler's channel*.



Gambar 2.5 Skema *water cooler's channel*

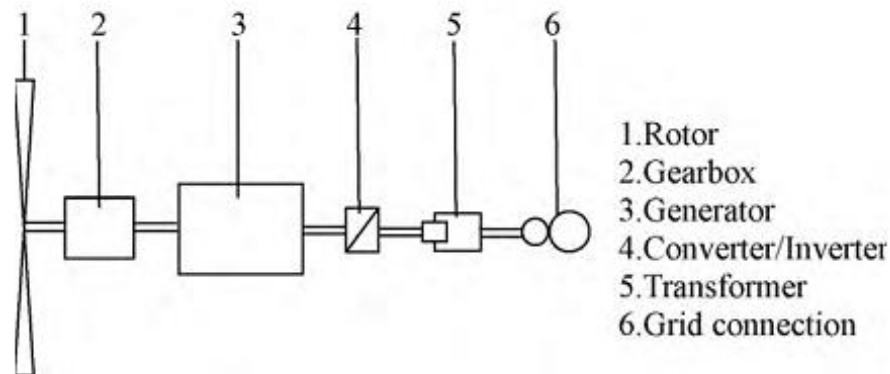
Terlihat pada Gambar 2.5 air laut dialirkan menuju kondensor dengan menggunakan pompa melawati *water cooler's channel* kemudian di alirakan kembali ke sumber asalnya.

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Hidro-kinetik

Pembangkit Listrik Tenaga Hidro-kinetik (PLTH) merupakan sebuah sistem pembangkitan listrik yang memanfaatkan energi kinetik pada aliran sungai, arus pasang surut ataupun aliran pada kanal buatan untuk menghasilkan energi listrik. Berbeda dengan pembangkit listrik tenaga air konvensional yang menggunakan *water head* dari konstruksi bendungan atau *penstock*, pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik memanfaatkan suatu aliran air tanpa mengubah atau memodifikasi jalur dari aliran air tersebut. Jenis PLTH dapat dibagi berdasarkan beberapa golongan, antara lain:

- a. Berdasarkan sumber energi hidro-kinetik yang digunakan:
 - PLTH yang menggunakan aliran,
 - PLTH yang menggunakan gelombang.
- b. Berdasarkan jenis aliran yang digunakan:
 - Aliran sungai,
 - Aliran pasang surut,
 - Aliran air laut,
 - Aliran irigasi dan kanal buatan lainnya.

Prinsip kerja PLTH yaitu, energi kinetik dari aliran air dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin yang kemudian digunakan untuk memutar generator untuk menghasilkan energi listrik. Sedangkan skema dari sistem PLTH berikut komponen-komponen utamanya dapat dilihat pada gambar berikut ini [4].



Gambar 2.6 Skema PLTH

2.4 Turbin Hidro-kinetik

Turbin Hidro-kinetik merupakan bagian yang berfungsi untuk merubah energi kinetik aliran air menjadi energi mekanik berupa torsi. Sejumlah energi dapat dihasilkan dari aliran air berdasarkan volume dan kecepatan aliran air. Turbin ini dapat beroperasi pada aliran air dengan kecepatan 0.5 m/s atau lebih. Prinsip kerja turbin hidro-kinetik hampir sama dengan turbin angin. Total energi yang dikonversi oleh turbin sebanding dengan massa jenis fluida kerja, area kerja turbin, kecepatan aliran pangkat tiga dan koefisien unjuk-kerja turbin.

$$P_a = \frac{1}{2} \times A \times \rho \times V^3 \times C_p \quad (2.1)$$

Dengan A adalah area kerja turbin (m^2), ρ adalah massa jenis air (1000 kg/m^3), V adalah kecepatan aliran air (m/s) dan C_p adalah koefisien unjuk kerja turbin (maksimal daya teoritis adalah 0,592).

Turbin hidro-kinetik merupakan turbin tanpa *head*. Turbin ini menghasilkan listrik menggunakan energi kinetik yang berasal

dari aliran air yang terdiri atas berbagai jenis rotor. Radius turbin dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.2. Koefisien unjuk-kerja turbin adalah fungsi non linier dari *tip speed ratio* dan *pitch angle*.

$$P_a = \frac{1}{2} \times \pi \times r^2 \times \rho \times V^3 \times C_p(\lambda, \beta) \times \mu_D \quad (2.2)$$

Dengan r adalah jari-jari turbin (m), η adalah efisiensi dari bagian yang lain, misalnya generator, *gearbox*, dan lain-lain, λ adalah *tip speed ratio*, dan β adalah *pitch angle* (derajat) turbin. *Tip speed ratio* dapat ditulis sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{w \times r}{V} \quad (2.3)$$

Dengan w adalah kecepatan angular dari turbin (rad/s).

Hubungan antara koefisien unjuk-kerja, *tip speed ratio* dan *pitch angle* dari turbin dapat dirumuskan sesuai dengan Persamaan 2.4 dan Persamaan 2.5.

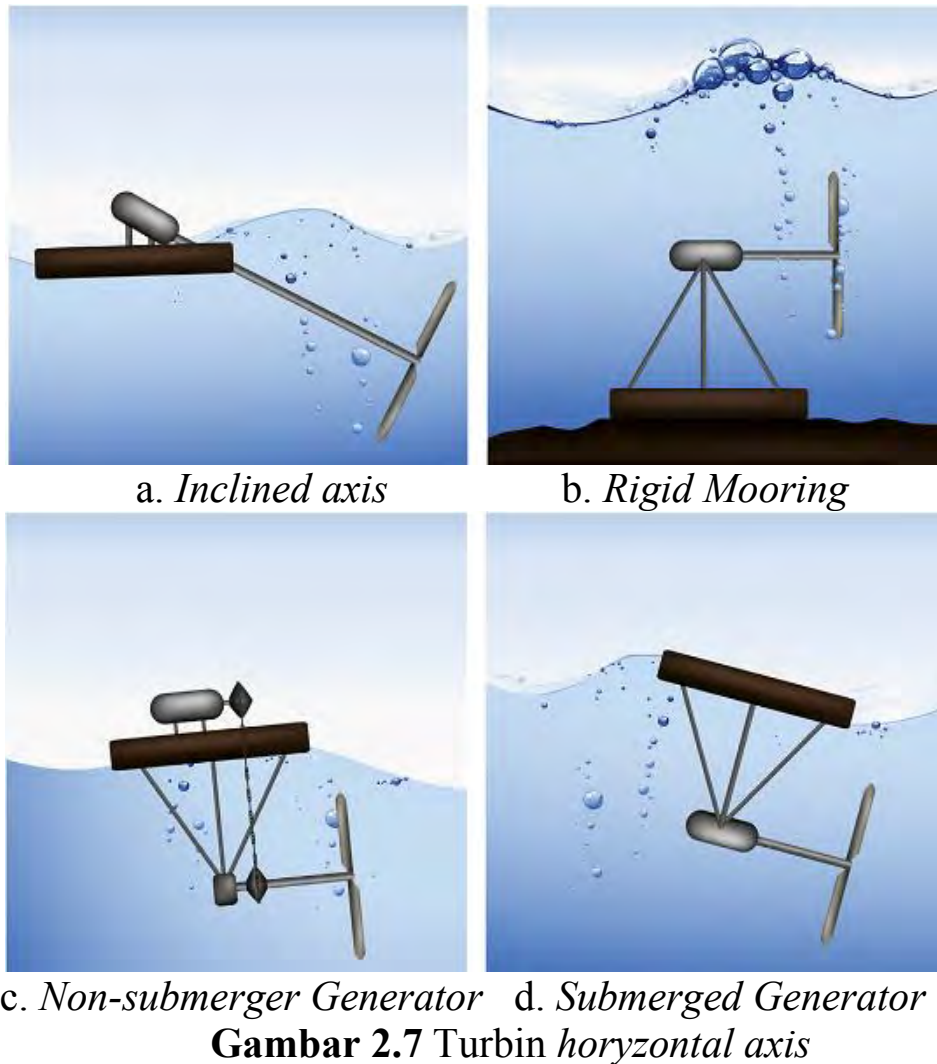
$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3\beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$

Nilai dari koefisien $C_1 = 0.5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, dan $C_6 = 0.0068$.

Jenis turbin yang digunakan pada PLTH skala kecil pada umumnya menggunakan turbin *axial-flow* dan *cross-flow*. Pemilihan jenis turbin berdasarkan pada jenis aliran, kecepatan aliran dan keluaran daya yang diinginkan. Turbin jenis *axial-flow* atau disebut juga turbin horizontal mempunyai sumbu axis sejajar dengan arah aliran fluida kerja. Beberapa jenis turbin *axial-flow* ditunjukkan Gambar 2.7. Turbin *inclined axis* (a) sering

digunakan pada sistem pembangkit listrik skala kecil di sungai. Sedangkan turbin axial-flow yang lain sering digunakan pada pembangkit listrik di wilayah laut.



Turbin *cross-flow* sesuai dengan Gambar 2.8 mempunyai sumbu *rotor axis* tegak lurus dengan arah aliran air atau sejajar dengan permukaan air. Turbin ini dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu turbin *vertical axis* dan *in-plane axis*. Turbin jenis *in-plane* (a) pada umumnya memanfaatkan gaya *drag* dan mempunyai efisiensi lebih rendah jika dibandingkan gaya *lift*-nya. Turbin *cross-flow* jenis lainnya pada umumnya digunakan pada pembangkit listrik yang memanfaatkan arus sungai [5].



(a) *In-plane axis*



(b) *Squirrel cage Darrieus*



(c) *H-Darrieus*



(d) *Darrieus*



(e) *Golov*



(f) *Savonius*

Gambar 2.8 *Turbin vertical axis*

2.5 Gearbox

Gearbox berfungsi sebagai *transformation ratio*, yaitu untuk meningkatkan kecepatan rotasi turbin air yang rendah agar sesuai dengan kecepatan rotasi dari generator [6].



Gambar 2.9 *Gearbox*

Pada *gearbox* terdapat istilah yang disebut *gear ratio*. *Gear ratio* merupakan perbandingan antara jumlah putaran yang dihasilkan gear output (*driving gear*) terhadap jumlah putaran gear input (*drive gear*) yang keduanya berbeda ukuran. Jika diketahui *gear ratio* dan kecepatan putaran gear input, maka dapat diketahui kecepatan putaran gear output.

$$N_1 Z_1 = N_2 Z_2 \quad (2.6)$$

$$N_1 \frac{Z_1}{Z_2} = N_2 \quad (2.7)$$

$$N_1 n = N_2 \quad (2.8)$$

Z_1 = jumlah *teeth* gear input

Z_2 = jumlah *teeth* gear output

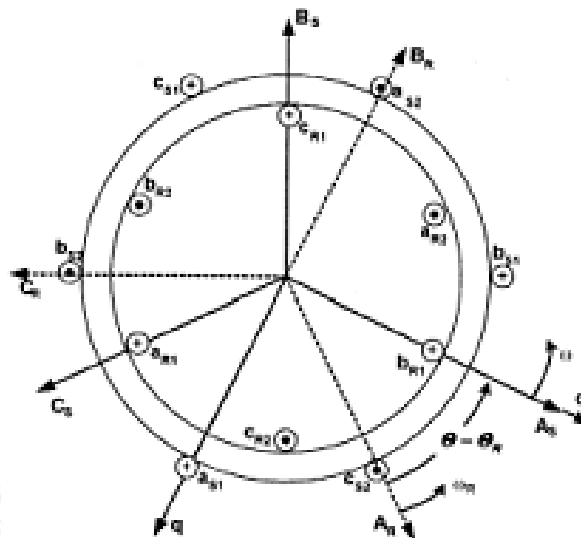
N_1 = kecepatan putaran gear input

N_2 = kecepatan putaran gear output

N = *gear ratio*

2.6 Generator Induksi

Generator induksi atau generator *asynchronous* merupakan jenis generator AC. Generator induksi bekerja berdasarkan prinsip aksi dan reaksi induksi elektromagnetik. Energi elektromekanik yang dihasilkan adalah bersifat *reversible*. Generator induksi dapat berfungsi sebagai motor listrik. Generator induksi mempunyai belitan *winding* tiga fasa pada bagian stator (A_S , B_S , C_S) dan *winding* tiga fasa pada rotor (A_R , B_R , C_R) seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. Stator adalah bagian luar yang diam dan rotor adalah bagian dalam yang bergerak. Rotor terletak di bagian tengah stator dan dipasang menggunakan *bearing*. Ketika *winding stator* diberi masukan arus tiga fasa, sebuah rotasi medan magnetik akan terbentuk. Kemudian torsi mekanik (misalnya torsi yang dihasilkan turbin) dikenakan pada bagian rotor dan berotasi diatas kecepatan *synchronous*-nya, maka akan dihasilkan energi listrik. Kecepatan angular dari rotasi medan magnetik disebut kecepatan *synchronous* (ω_s).



Gambar 2.10 *Winding* pada generator induksi

Pada sistem pembangkit listrik, model generator induksi dibagi menjadi dua macam, yaitu model detail dan model sederhana. Model detail mencakup kondisi transien pada

rangkaian stator dan rotor. Sedangkan model sederhana tidak mencakup kondisi tersebut. Model yang lebih umum adalah yang kedua. Berikut adalah beberapa persamaan matematis model generator induksi sederhana [7].

a. Fluks Magnetik

$$\varphi_{sd} = X_s I_{sd} + X_m I_{rd} \quad (2.9a)$$

$$\varphi_{sq} = X_s I_{sq} + X_m I_{rq} \quad (2.9b)$$

$$\varphi_{rd} = X_r I_{rd} + X_m I_{sd} \quad (2.9c)$$

$$\varphi_{rq} = X_r I_{rq} + X_m I_{sq} \quad (2.9d)$$

φ_{sd} = fluks magnetik stator sumbu d

φ_{sq} = fluks magnetik stator sumbu q

φ_{rd} = fluks magnetik rotor sumbu d

φ_{rq} = fluks magnetik rotor sumbu q

X_s = reaktansi stator

X_r = reaktansi rotor

X_m = reaktansi magnetisasi

I_{sd} = arus stator sumbu d

I_{sq} = arus stator sumbu q

I_{rd} = arus rotor sumbu d

I_{rq} = arus rotor sumbu q

b. Tegangan

$$V_{sd} = -R_s I_{sd} + \omega_s \varphi_{sq} - \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \quad (2.10a)$$

$$V_{sq} = -R_s I_{sq} - \omega_s \varphi_{sd} - \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (2.10b)$$

$$0 = -R_r I_{rd} + s\omega_s \varphi_{rq} - \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \quad (2.10c)$$

$$0 = -R_r I_{rq} - s\omega_s \varphi_{rd} - \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \quad (2.10d)$$

V_{sd} = tegangan stator sumbu d

V_{sq} = tegangan stator sumbu q

R_s = resistansi stator

R_r = resistansi rotor

c. Slip Rotor

Slip rotor (s) bernilai positif ketika beroperasi pada mode motor listrik dan bernilai negatif pada mode generator.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_g}{\omega_s} \quad (2.11)$$

d. Torsi Elektrik

Torsi Elektrik (T_e) bernilai positif ketika beroperasi pada mode motor listrik dan bernilai negatif pada mode generator.

$$T_e = \varphi_{qr} I_{dr} - \varphi_{dr} I_{qr} \quad (2.12)$$

e. Daya (P), Daya Aktif (P_{active}) dan Daya Reaktif ($P_{reactive}$)

$$P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} + V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \quad (2.13)$$

$$P_{active} = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (2.14)$$

$$P_{reactive} = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \quad (2.15)$$

2.7 Pulse Width Modulation (PWM) Inverter

Alat listrik yang berfungsi untuk mengkonversi tegangan DC menjadi AC disebut inverter. Modern inverter mempunyai dua sumber tegangan DC. Tegangan AC dihasilkan melalui proses *switching* antar kedua sumber DC pada inverter pada frekuensi tinggi. *Switching* frekuensi tinggi pada inverter menggunakan semikonduktor jenis *switching* (misalnya transistor) [8].

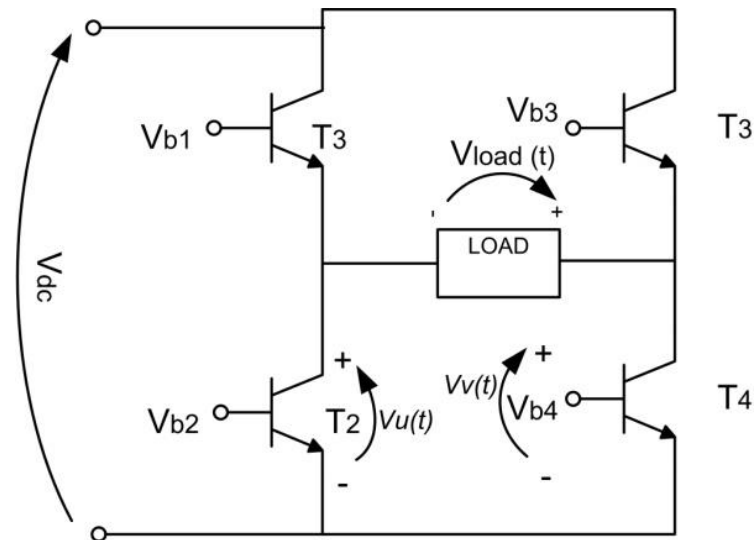
Inverter dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan cara kerjanya, yaitu:

- a. *Voltage Source Inverters* (VSI)
- b. *Current Source Inverters* (CSI)

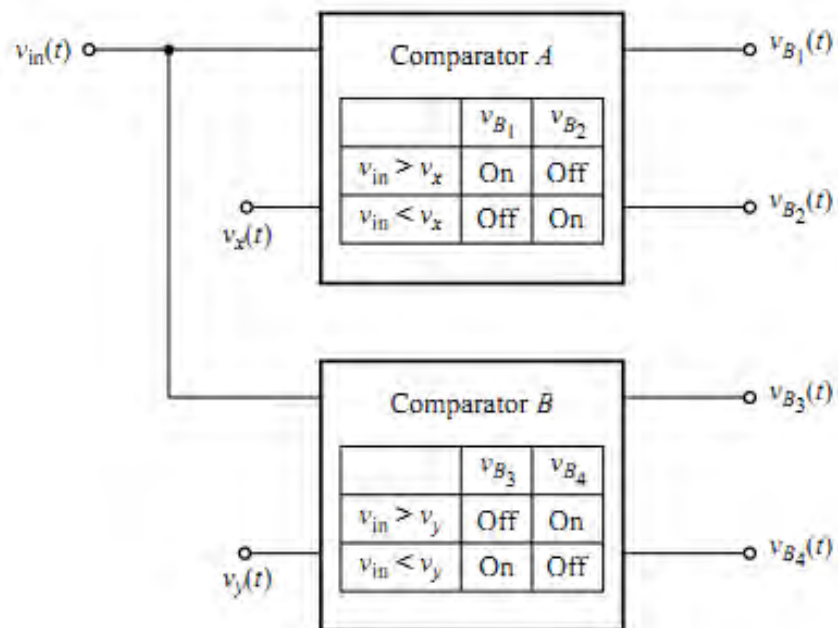
Current Source Inverters diberi masukan dari sumber arus DC dengan impedansi tinggi, misalnya sumber arus DC yang sangat kuat. Pada CSI diberi masukan arus DC yang sangat kuat hingga keluaran arus berbentuk gelombang dan tidak berubah terhadap perubahan beban. Sedangkan *Voltage Source Inverters* menggunakan sumber arus DC yang sangat kecil dengan impedansi yang dapat diabaikan. Namun, VSI menggunakan sumber tegangan DC yang sangat kuat pada *input* terminalnya. CSI tidak membutuhkan diode yang berfungsi sebagai *feedback*, sedangkan VSI masih membutuhkannya [9].

Pulse Width Modulation (PWM) adalah suatu teknik dimana masukan tegangan DC dikonversi menjadi tegangan AC dengan cara mengatur periode *switching* kontroler pada inverter [9]. Konsep dasar dari PWM dapat diilustrasikan pada Gambar 2.11, Gambar 2.12 dan Gambar 2.13. Gambar 2.11 menunjukkan sebuah rangkaian PWM inverter *single-phase* dengan menggunakan *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT). IGBT₁ dan IGBT₄ pada rangkaian dikontrol oleh dua komparator yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Komparator adalah suatu komponen yang berfungsi untuk membandingkan tegangan *input* $v_{in}(t)$ terhadap sinyal referensi dan melakukan *switching on-off* pada transistor berdasarkan hasil perbandingan. Komparator A membandingkan tegangan $v_{in}(t)$ terhadap tegangan referensi $v_x(t)$ dan mengontrol T₁ IGBT dan T₂ IGBT berdasarkan hasil perbandingan. Kemudian Komparator B membandingkan tegangan $v_{in}(t)$ terhadap tegangan referensi $v_y(t)$ dan mengontrol T₃ IGBT dan T₄ IGBT berdasarkan hasil perbandingan. Jika $v_{in}(t)$ lebih besar daripada $v_x(t)$ pada waktu t , maka komparator A akan melakukan *turn on* T₁ IGBT dan *turn off* T₂ IGBT kemudian terjadi *turn off* T₁ IGBT dan *turn on* T₂ IGBT dan seterusnya. Hal yang sama juga terjadi pada komparator B, jika $v_{in}(t)$ lebih besar daripada $v_y(t)$ pada waktu t , maka komparator B akan melakukan *turn on* T₃ IGBT dan *turn off* T₄ IGBT kemudian terjadi *turn off*

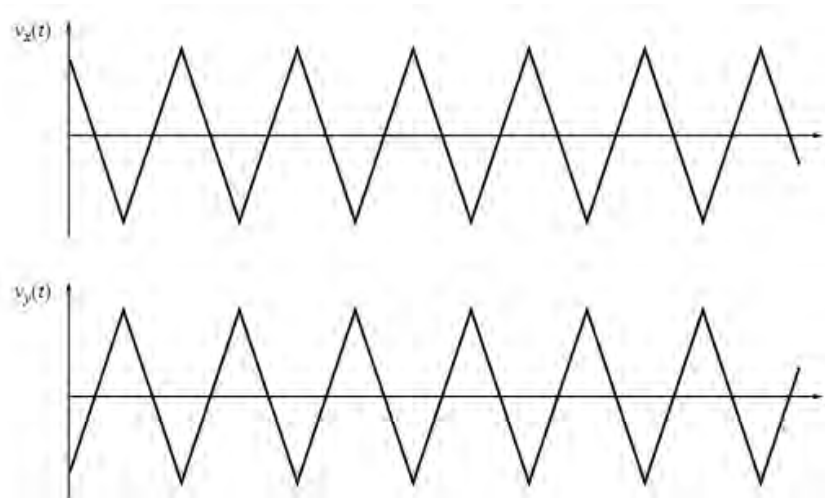
T_3 IGBT dan *turn on* T_4 IGBT dan seterusnya. Tegangan referensi $v_x(t)$ dan $v_y(t)$ dapat ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.11 Rangkaian single-phase PWM dengan IGBTs

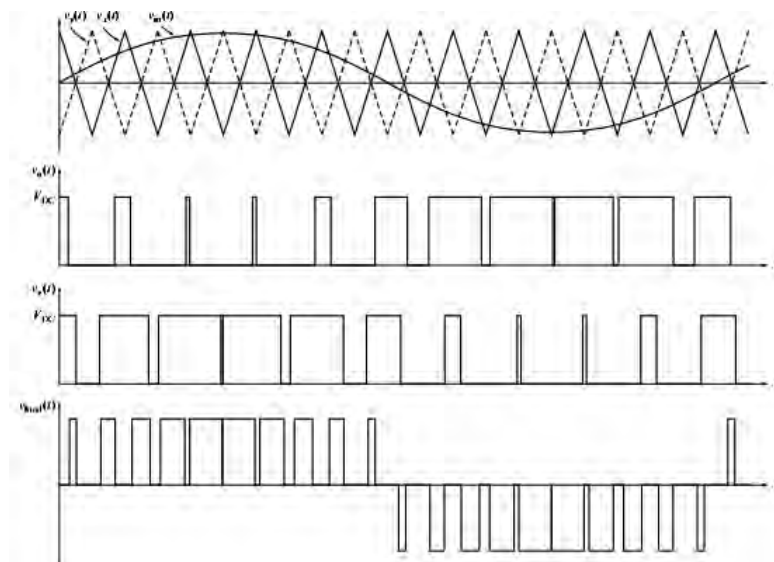


Gambar 2.12 Komparator pada transistor



Gambar 2.13 Tegangan referensi komparator

Ketika sebuah *sinusoidal control voltage* diaplikasikan pada rangkaian inverter maka *width* barisan pulsa yang dihasilkan akan bervariasi membentuk pola *sinusoidal* yang bergantung pada kontrol voltase tersebut. Hal itu dapat diilustrasikan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Output rangkaian PWM dengan *sinusoidal control voltage*

Sebuah PWM inverter tiga fasa terdiri atas tiga inverter satu fasa yang memiliki *control voltages sinusoidal* dengan sudut geser antar fasa sebesar 120° . Kontrol frekuensi pada PWM inverter adalah dengan cara merubah frekuensi *input* pada *control voltage* [10].

2.8 Three-Phase Transformer

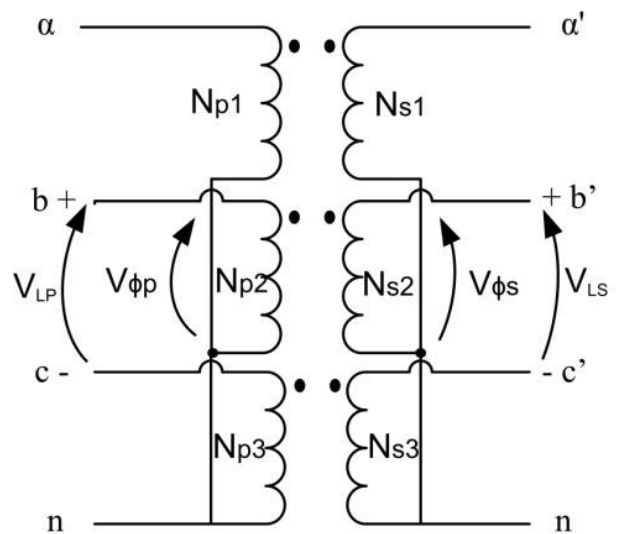
Transformer adalah sebuah alat yang berfungsi untuk merubah energi listrik AC pada suatu level tegangan tertentu ke energi listrik AC pada level tegangan yang lainnya dengan memanfaatkan medan magnetik. *Transformer* terdiri atas dua atau lebih *coil*, yaitu berupa belitan *winding* pada sebuah inti *ferromagnetic*. *Coil* ini pada umumnya tidak saling terhubung secara langsung. Masing-masing *coil* dihubungkan oleh *flux magnetic* yang dihasilkan oleh masing-masing inti *ferromagnetic* [10].

Transformer untuk rangkaian tiga fasa dapat menggunakan satu *transformer* tiga fasa atau menggunakan tiga *transformer* satu fasa yang terpisah. *Transformer* tiga fasa sebenarnya terdiri atas tiga *transformer* yang dijadikan satu dalam satu core atau inti. Bagian *primary* dan *secondary* dapat saling terhubung dengan sambungan tipe wye (Y) atau delta (Δ). Berdasarkan jenis-jenis sambungannya *transformer* dapat dibedakan menjadi empat jenis, yaitu:

a. Wye-wye (Y-Y)

Skema *transformer* dengan sambungan wye-wye ditunjukkan pada Gambar 2.15. Tegangan pada bagian *primary* pada masing-masing fasa adalah $V_{\phi P} = V_{LP} / \sqrt{3}$. kemudian tegangan pada bagian *secondary* pada masing-masing fasa adalah $V_{LS} = \sqrt{3} V_{\phi S}$. Sehingga hubungan antara keduanya dapat ditulis sesuai dengan Persamaan 2.15 dan selanjutnya disebut dengan *voltage ratio*.

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = \alpha \quad (2.16)$$

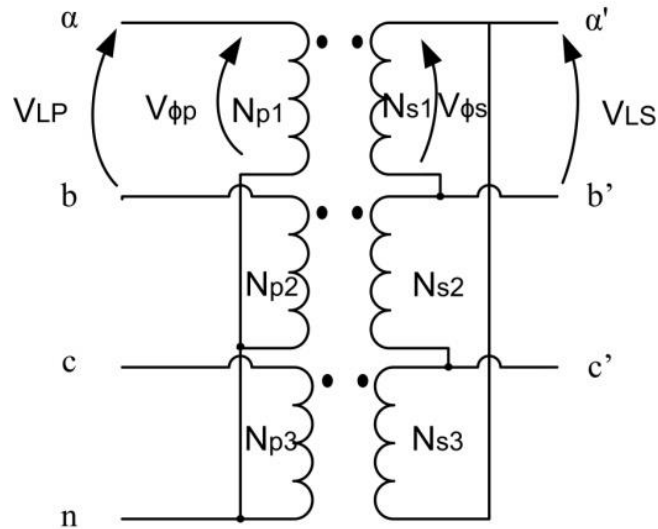


Gambar 2.15 Skema Transformer dengan sambungan wye-wye

b. Wye-delta (Y- Δ)

Skema transformer dengan sambungan wye-wye ditunjukkan pada Gambar 2.16. Hubungan antara *primary line voltage* dengan *primary phase voltage* adalah $V_{LP} = \sqrt{3} V_{\phi P}$. Sedangkan hubungan antara *secondary line voltage* dengan *secondary phase voltage* adalah $V_{LS} = V_{\phi S}$. Sehingga *voltage ratio* dapat ditulis.

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3} \alpha \quad (2.17)$$

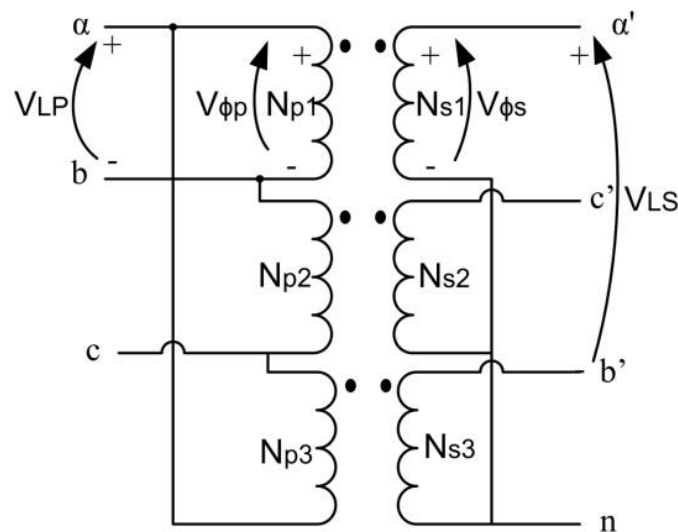


Gambar 2.16 Skema Transformer dengan sambungan wye-delta

c. Delta-wye (Δ -Y)

Skema transformer dengan sambungan delta-wye ditunjukkan pada Gambar 2.17. Hubungan antara *primary line voltage* dengan *primary phase voltage* adalah $V_{LP} = V_{\phi p}$. Sedangkan hubungan antara *secondary line voltage* dengan *secondary phase voltage* adalah $V_{LS} = \sqrt{3} V_{\phi s}$. Sehingga *voltage ratio* dapat ditulis.

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}}{\alpha} \quad (2.18)$$

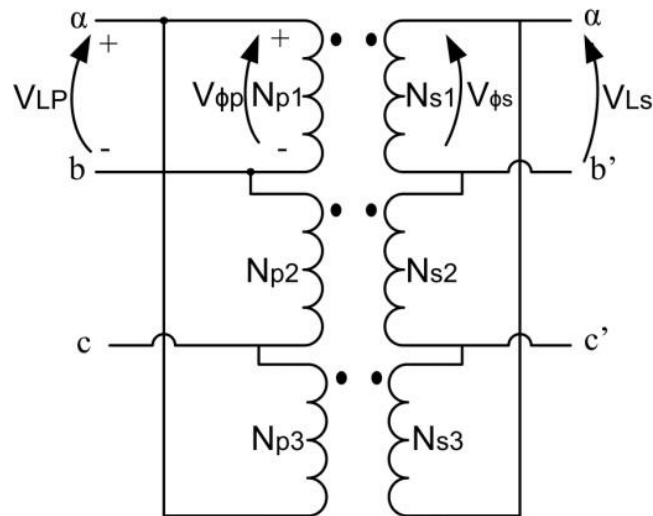


Gambar 2.17 Skema Transformer dengan sambungan delta-wye

d. Delta-delta (Δ - Δ)

Skema transformer dengan sambungan delta-wye ditunjukkan pada Gambar 2.18. Hubungan antara *primary line voltage* dengan *primary phase voltage* adalah $V_{LP} = V_{\phi P}$. Sedangkan hubungan antara *secondary line voltage* dengan *secondary phase voltage* adalah $V_{LS} = V_{\phi S}$. Sehingga *voltage ratio* dapat ditulis.

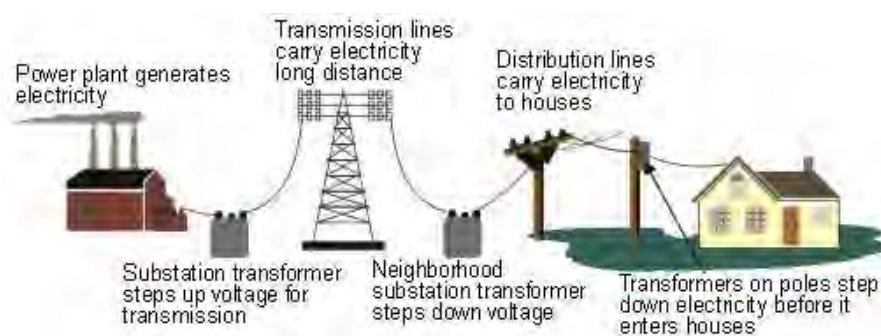
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \alpha \quad (2.19)$$



Gambar 2.18 Skema Transformor dengan sambungan delta-delta

2.9 Jala-jala (*Grid*)

Jala-jala (grid) adalah sebuah jaringan yang saling terhubung yang berfungsi untuk mendistribusikan energi listrik dari sumber listrik ke pemakai. Sistem *jala-jala (grid)* sendiri terdiri atas stasiun pembangkit listrik yang menghasilkan energi listrik, jalur distribusi bertegangan tinggi yang membawa energi listrik dari sumber ke pusat distribusi dan jalur distribusi yang terhubung hingga pemakai[11].

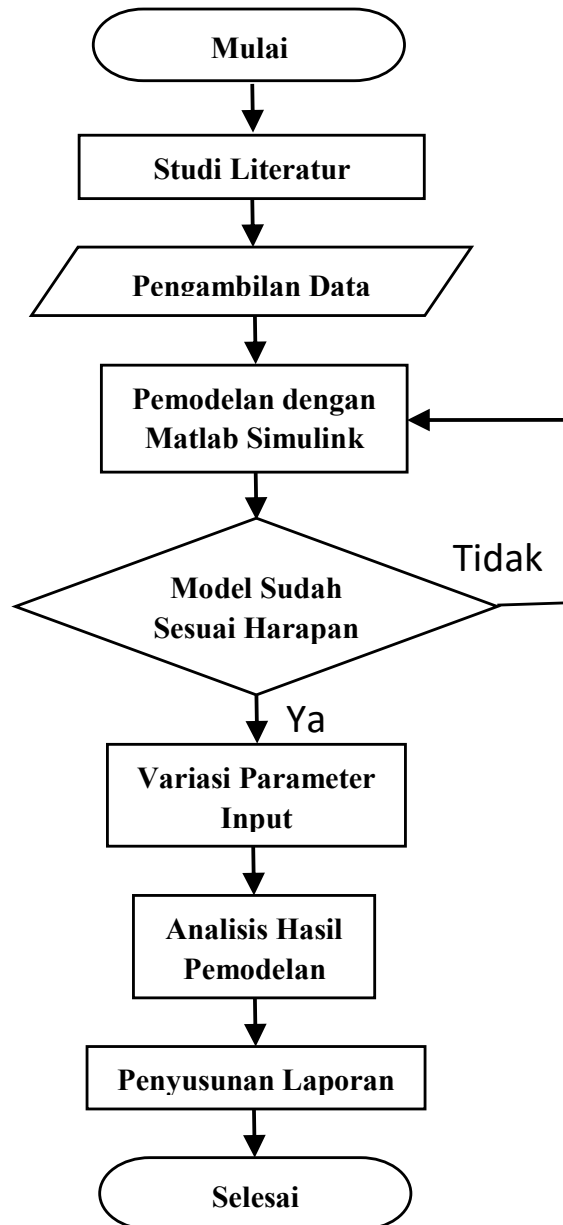


Gambar 2.19 Diagram sederhana jala-jala (*grid*)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alir penelitian pada tugas akhir ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Studi Literatur

Literatur yang menjadi dasar atau referensi pada penyusunan tugas akhir ini adalah literatur mengenai pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Hidro-kinetik (PLTH), mulai dari bagian turbin hidro-kinetik, persamaan matematis yang digunakan, generator induksi, DC-AC inverter, *transformer* dan jala-jala (*grid*). Selain literatur terkait pemodelan PLTH, juga digunakan literatur mengenai mengenai Simulink Matlab.

3.3 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan di PT. PJB UP-Paiton pada bulan Oktober 2015. Pengambilan data dilakukan dengan melihat kondisi lapangan secara langsung serta wawancara dengan pihak PT. PJB UP-Paiton.

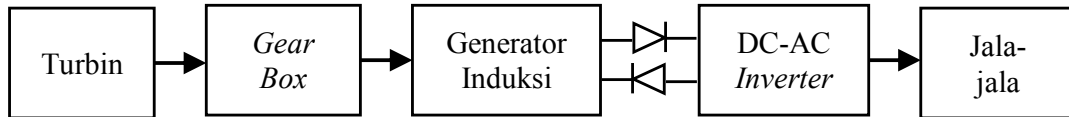


Gambar 3.2 *Water cooler's channel* PLTU

Gambar 3.2 menunjukkan kondisi lapangan pada *Water cooler's channel* PLTU yang akan dimanfaatkan menjadi sistem PLTH. *Water cooler's channel* PLTU mempunyai lebar sekitar 15 m dan kedalaman sekitar 10 m. Sedangkan kecepatan air pada kanal berkisar antara 1 hingga 3 m/detik.

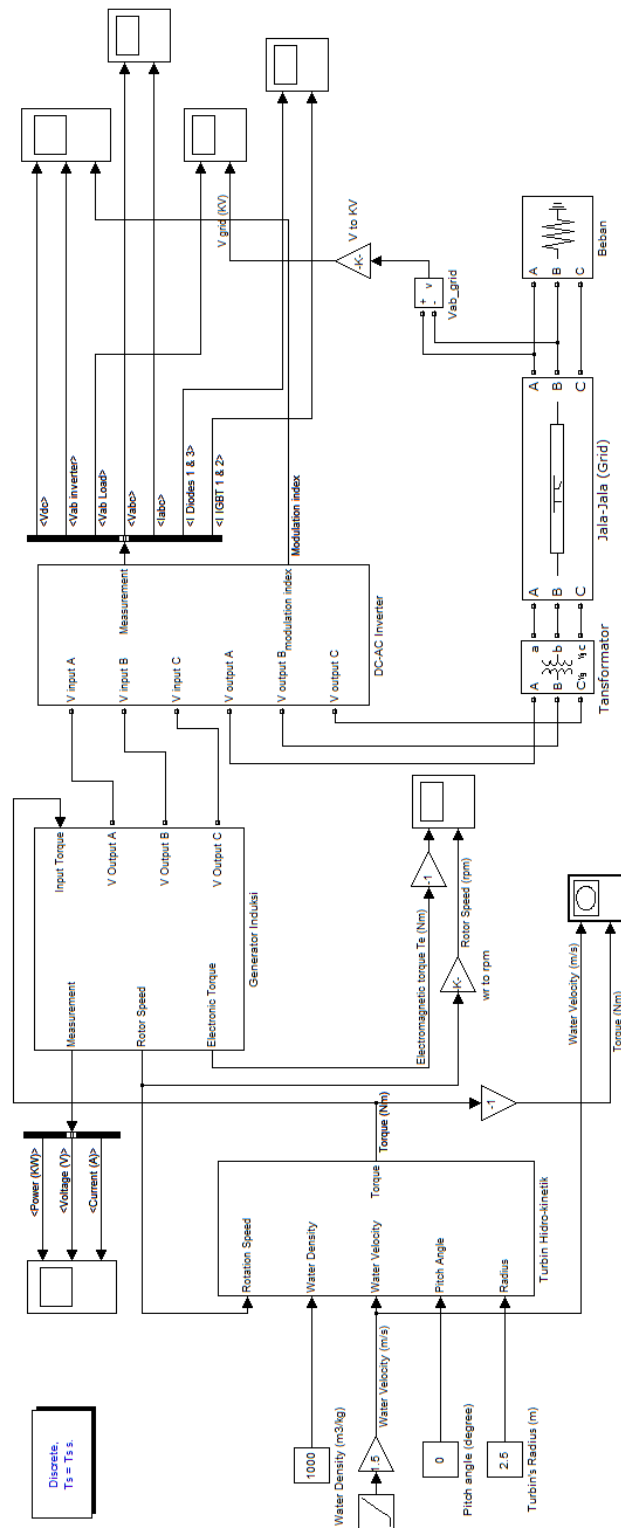
3.4 Diagram Blok Sistem dan Pemodelan

Berikut adalah diagram blok pemodelan sistem PLTH ini.



Gambar 3.3 Diagram blok sistem PLTH

Aliran air pada *Water cooler's channel* akan mendorong turbin hidro-kinetik sehingga turbin berputar dan menghasilkan torsi. Putaran turbin dihubungkan dengan rotor menggunakan *gearbox*. Putaran pada rotor generator menyebabkan generator menghasilkan tegangan listrik bolak-balik atau AC. Tegangan listrik bolak-balik disearahkan dengan menggunakan dioda *rectifier* sehingga menghasilkan tegangan searah atau DC. Kemudian tegangan searah dikonversi menjadi tegangan listrik bolak-balik tiga fasa menggunakan DC-AC inverter. Tegangan listrik bolak-balik dinaikkan dengan menggunakan *transformer* dan dihubungkan dengan jala-jala (*grid*). Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan sistem PLTH.



Gambar 3.4 Pemodelan keseluruhan sistem PLTH
Sistem terdiri dari 5 subsistem utama, yaitu turbin hidro-kinetik, gearbox, generator induksi, DC-AC inverter dan jala-jala (*grid*).

Input sistem:

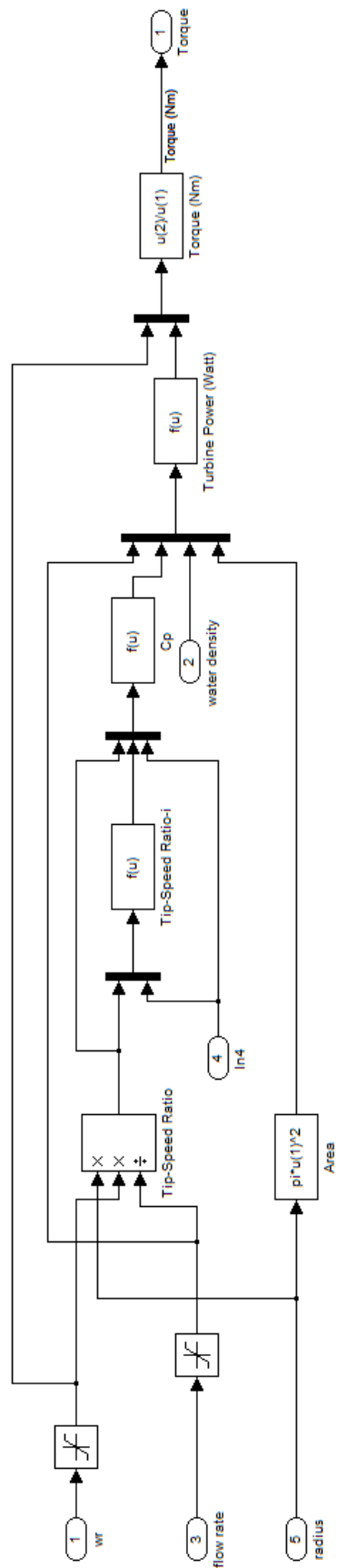
- kecepatan air, dalam satuan m/s
- *pitch angle* (β), dalam satuan derajat
- Jari-jari turbin (R), dalam satuan meter

Output sistem:

- torsi mekanik turbin hidro-kinetik (τ), dalam satuan Nm
- tegangan generator, dalam satuan volt
- arus generator, dalam satuan ampere
- daya generator (P), dalam satuan kilowatt
- kecepatan putaran rotor generator (ω_g), dalam satuan rad/s
- torsi elektrik (T_e) generator, dalam satuan Nm
- tegangan DC inverter (V_{dc}), dalam satuan volt
- tegangan inverter (V_{ab}), dalam satuan volt
- tegangan load pada inverter (V_{ab}), dalam satuan volt
- tegangan tiga fasa inverter (V_{abc}), dalam satuan volt
- tegangan pada jala-jala (*grid*) (V_{grid}), dalam satuan kilovolt
- arus tiga fasa inverter (I_{abc}), dalam satuan ampere
- arus diode 1 dan 3 inverter, dalam satuan ampere
- arus IGBT 1 dan 2 inverter, dalam satuan ampere
- modulation index inverter

3.4.1 Blok Sub-sistem Turbin Hidro-kinetik

Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan sub-sistem turbin *hydrokinetic*.



Gambar 3.5 Pemodelan sub-sistem turbin hidro-kinetik

Input:

- kecepatan putaran rotor generator (ω_g), dalam satuan rad/s
- kecepatan air, dalam satuan m/s
- *pitch angle* (β), dalam satuan derajat
- jari-jari turbin (R), dalam satuan meter

Output:

- torsi turbin (τ), dalam satuan Nm

Besarnya torsi yang dihasilkan oleh turbin hidro-kinetik adalah mengikuti persamaan matematis berikut ini.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (3.1)$$

Daya yang dihasilkan oleh turbin hidro-kinetik adalah sebagai berikut.

$$P_a = \frac{1}{2} \times A \times \rho \times V^3 \times C_p \quad (3.2)$$

Koefisien unjuk-kerja turbin hidro-kinetik adalah sebagai berikut.

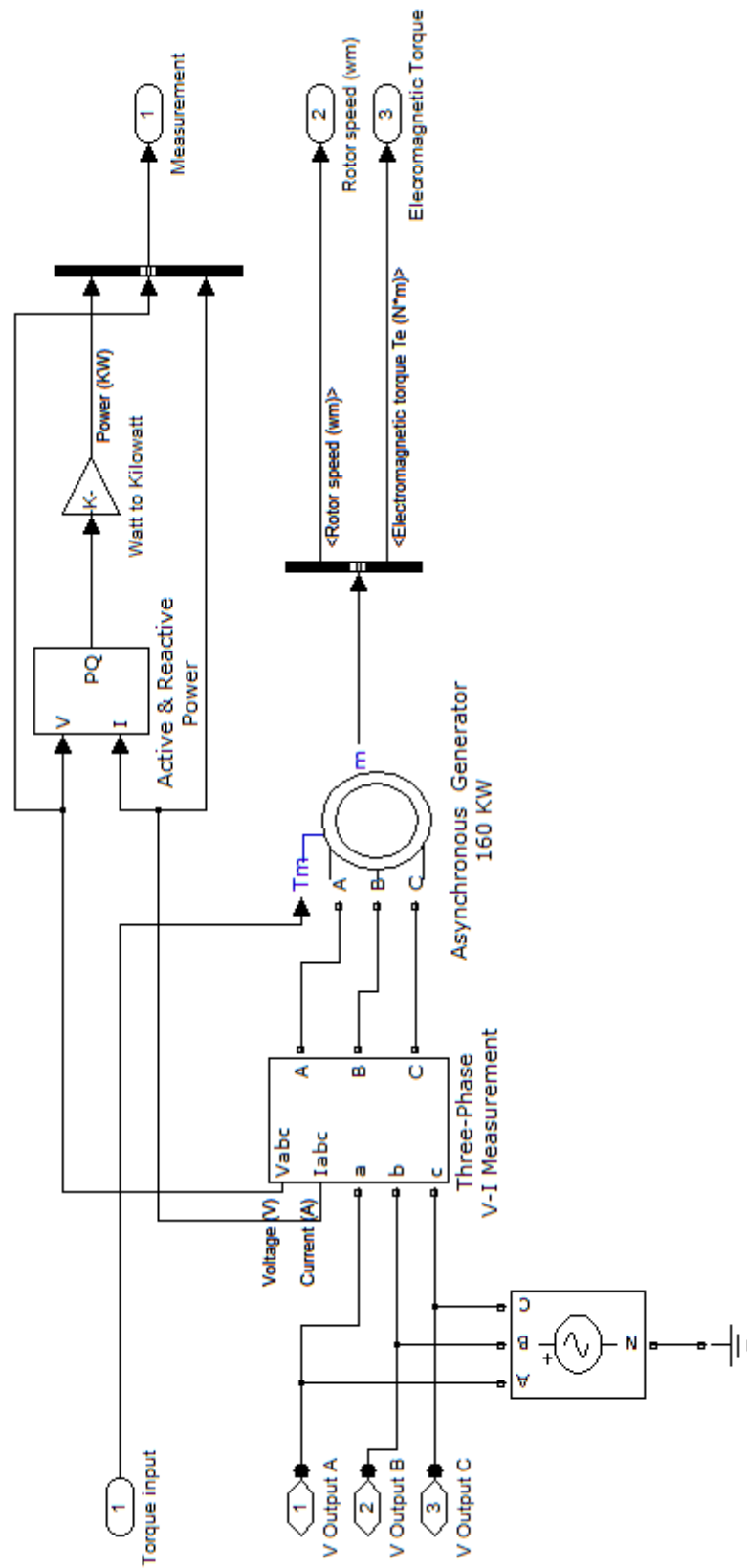
$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3\beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.4)$$

Nilai dari koefisien $C_1 = 0.5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, dan $C_6 = 0.0068$.

3.4.3 Blok Sub-sistem Generator Induksi

Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan sub-sistem generator induksi.



Gambar 3.6 Pemodelan sub-sistem generator induksi

Input:

- torsi turbin (τ), dalam satuan Nm

Output:

- daya generator (P), dalam satuan kilowatt
- tegangan generator, dalam satuan volt
- arus generator, dalam satuan ampere
- kecepatan putaran rotor generator (ω_g), dalam satuan rad/s
- torsi elektrik (T_e), dalam satuan Nm
- tegangan tiga fasa generator (V_{ABC}), dalam satuan volt

Berikut adalah beberapa persamaan matematis model generator induksi :

- Fluks magnetik

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (3.5a)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (3.5b)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (3.5c)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (3.5d)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (3.5e)$$

$$L'_s = L'_{ls} + L_m \quad (3.5e)$$

- Tegangan

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds} \quad (3.6a)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs} \quad (3.6b)$$

$$V'_{qr} = R'_s i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (3.6c)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (3.6d)$$

- Torsi Elektrik

$$T_e = 1,5p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (3.7)$$

- Sistem Mekanik

$$\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m) \quad (3.8a)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_m = \omega_m \quad (3.8b)$$

- Daya (P), Daya Aktif (P_{active}) dan Daya Reaktif ($P_{reactive}$)

$$P = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} + V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs} \quad (3.9)$$

$$P_{active} = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} \quad (3.10)$$

$$P_{reactive} = V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs} \quad (3.11)$$

3.4.4 Blok Sub-sistem DC-AC Inverter

Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan sub-sistem DC-AC inverter.

Input:

- tegangan tiga fasa generator (V_{ABC}), dalam satuan volt

Output:

- tegangan DC inverter (V_{dc}), dalam satuan volt
- tegangan inverter (V_{ab}), dalam satuan volt
- tegangan load pada inverter (V_{ab}), dalam satuan volt
- tegangan tiga fasa inverter (V_{abc}), dalam satuan volt
- arus diode 1 dan 3 inverter, dalam satuan ampere
- arus IGBT 1 dan 2 inverter, dalam satuan ampere
- modulation index inverter
- tegangan tiga fasa inverter (V_{ABC}), dalam satuan volt

Berikut adalah beberapa persamaan matematis pada model DC-AC Inverter :

- Arus pada diode

$$I = I_s(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1) \quad (3.12)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3.13)$$

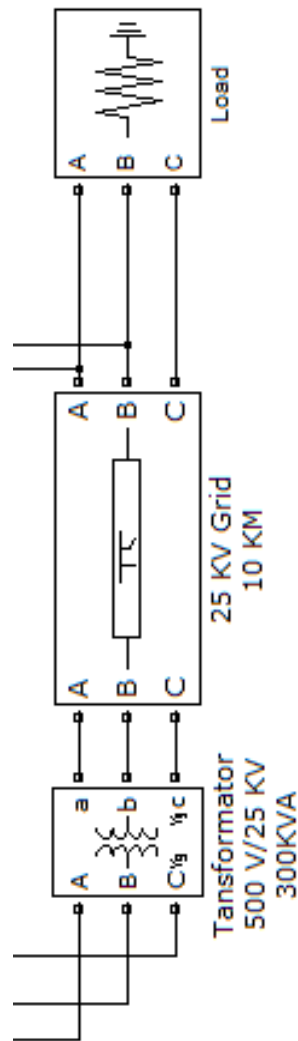
Besarnya tegangan suhu V_T adalah 25.85 mV pada suhu 300 K dan 26 mV pada suhu normal. n adalah faktor keidealisan dioda (n pada diode silikon berkisar antara 1-2)

- *Modulation index* IGBT

$$m = \frac{V_{ref}}{V_{car}} \quad (3.14)$$

3.4.5 Blok Sub-sistem Jala-jala (*Grid*)

Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan sub-sistem jala-jala (*grid*).



Gambar 3.8 Pemodelan sub-sistem jala-jala (*grid*)

Berikut adalah beberapa persamaan matematis pada model transformator :

- Tegangan primer dan tegangan sekunder

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (3.15)$$

- Arus primer dan arus sekunder

$$N_p i_p(t) = N_s i_s(t) \quad (3.16)$$

- Daya masukan dan daya keluaran

$$P_{out} = V_p I_p \cos \theta = P_{in} \quad (3.17a)$$

$$\theta = \theta_p - \theta_s \quad (3.17b)$$

- Daya reaktif, daya semu dan impedansi

$$Q_{in} = V_p I_p \sin \theta = V_s I_s \sin \theta = Q_{out} \quad (3.18)$$

$$S_{in} = V_p I_p = V_s I_s = S_{out} \quad (3.19)$$

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} \quad (3.20)$$

- Transformator tiga fasa sambungan Y-Y

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = \alpha \quad (3.21)$$

Berikut adalah beberapa persamaan matematis pada model kabel power :

- Parameter RLC

$$R_1 = r_1 l \sec k_{r1} \quad (3.21a)$$

$$L_1 = l_1 l \sec k_{l1} \quad (3.21b)$$

$$C_1 = c_1 l \sec k_{c1} \quad (3.21c)$$

$$R_0 = r_0 l \sec k_{r0} \quad (3.21d)$$

$$L_0 = l_0 l \sec k_{l0} \quad (3.21e)$$

$$C_0 = c_0 l \sec k_{c0} \quad (3.21f)$$

Dimana k_{r1} , k_{l1} , k_{c1} , k_{r0} , k_{l0} , dan k_{c0} merupakan faktor *hyperbolic correction*. k bernilai nol jika panjang kabel power kurang dari 50 km.

$$R_s = (2R_1 + R_0)/3 \quad (3.22a)$$

$$Ls = (2L_1 + L_0)/3 \quad (3.22b)$$

$$Rm = (R_0 - R_1)/3 \quad (3.22c)$$

$$Lm = (L_0 - L_1)/3 \quad (3.22d)$$

$$C_p = C_1 \quad (3.22e)$$

$$C_g = 3C_1C_0/(C_1 - C_0) \quad (3.22f)$$

3.5 Perhitungan Efisiensi Sistem PLTH

Besarnya efisiensi sistem PLTH adalah perbandingan antara daya *output* sistem PLTH dengan energi kinetik kecepatan air yang menjadi masukan sistem PLTH. Besarnya efisiensi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$\mu = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% \quad (3.23)$$

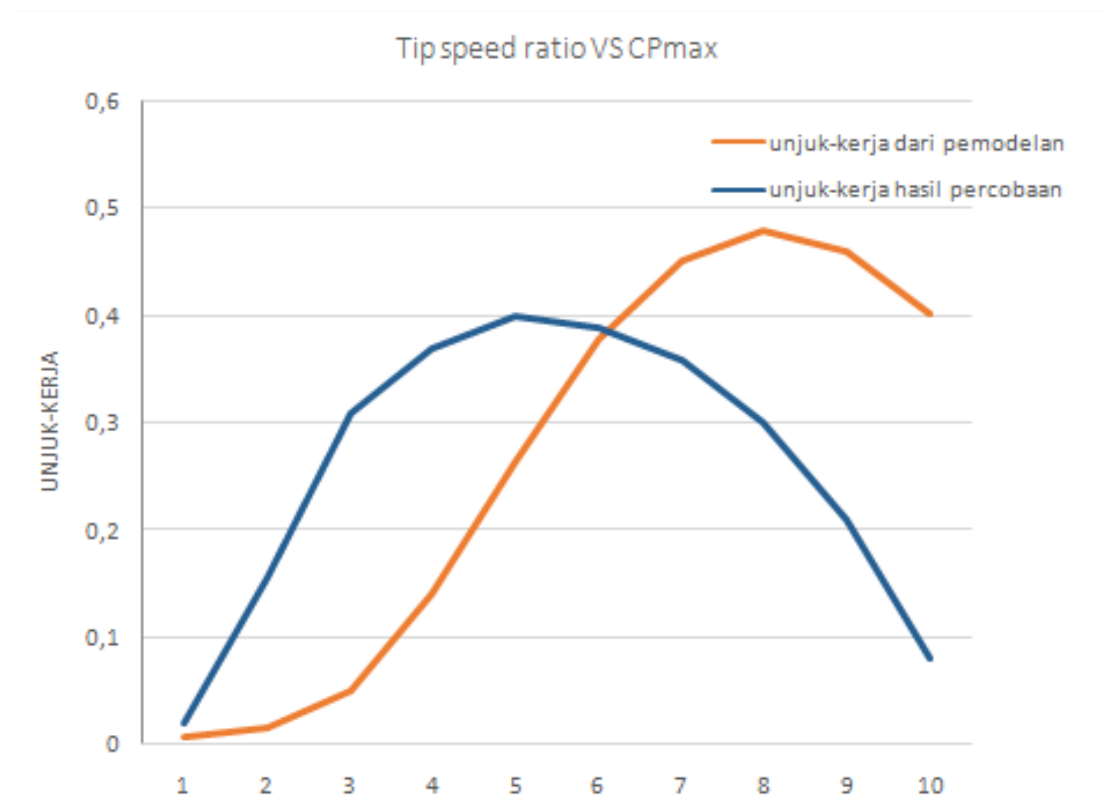
$$P_{input} = \frac{1}{2} \times A \times \rho \times V^3 \quad (3.24)$$

Perhitungan efisiensi sistem PLTH adalah sebagai berikut:

$$\mu = \frac{132,5 \text{ kW}}{265,1785714 \text{ kW}} \times 100\% = 49,97 \%$$

3.6 Perbandingan Unjuk Kerja Turbin Hidro-kinetik

Berikut adalah ilustrasi perbandingan unjuk-kerja turbin hidro-kinetik yang digunakan pada pemodelan PLTH dan hasil percobaan turbin hidro-kinetik dengan airfoil S814 berkapasitas 300 kW [1].



Gambar 3.9 Perbandingan unjuk-kerja turbin hidro-kinetik

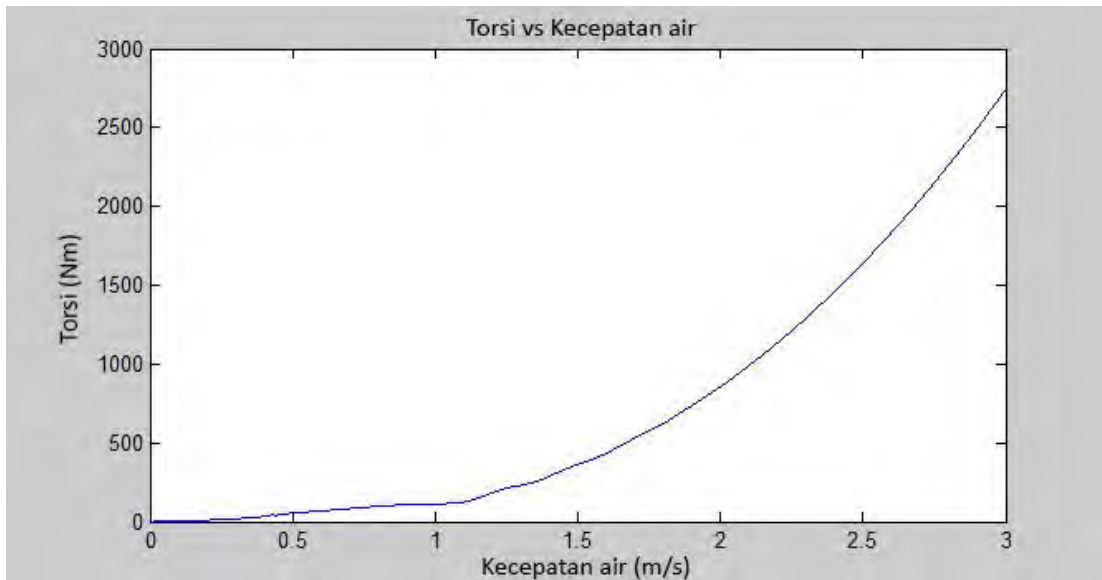
3.7 Analisis Hasil Pemodelan

Berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan dengan Matlab Simulink, akan dilakukan analisa variasi *pitch angle* terhadap torsi yang dihasilkan oleh turbin hidro-kinetik. Kemudian diperoleh performa terbaik dari turbin hidro-kinetik pada variasi *pitch angle* tertentu. Setelah itu dilakukan analisa sistem PLTH secara keseluruhan, yaitu mulai dari bagian turbin hidro-kinetik, generator induks, DC-AC inverter, *transformers* dan jala-jala (*grid*).

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Torsi Turbin Hidro-kinetik pada *pitch angle* 0° pada Kecepatan Air 0-3m/detik

Grafik respon pemodelan Simulink pada sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan *pitch angle* turbin sebesar 0° dengan kecepatan air yang mengenai turbin antara 0-3 m/detik ditunjukkan oleh gambar berikut ini dengan torsi pada sumbu Y dan kecepatan air pada sumbu X.



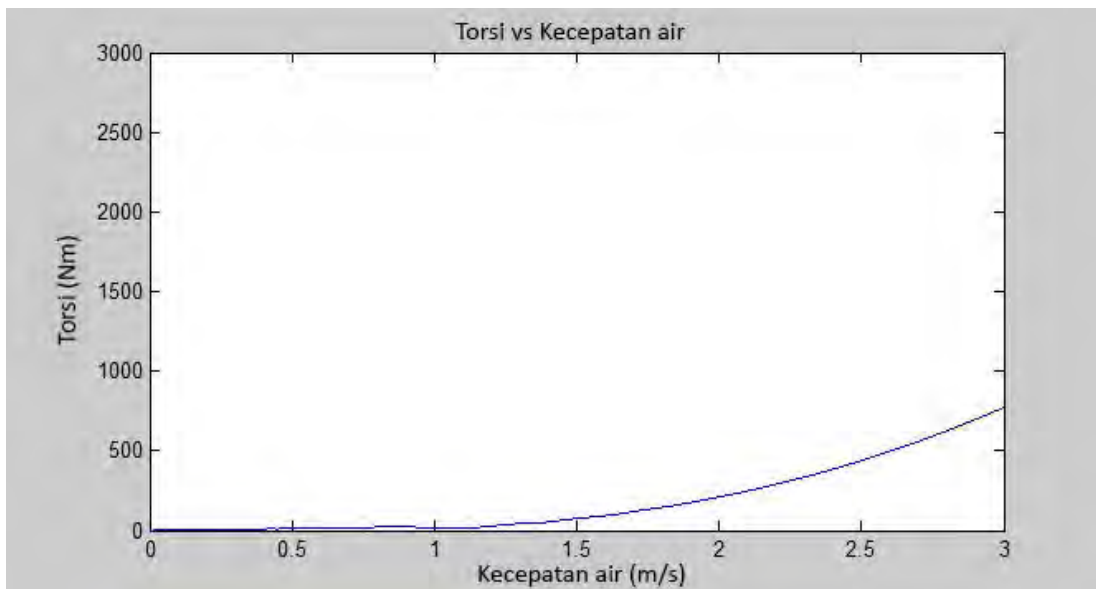
Gambar 4.1 Torsi turbin hidro-kinetik pada *pitch angle* 0 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik

Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa hubungan antara kecepatan air yang mengenai turbin sebanding dengan besarnya torsi mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Semakin tinggi kecepatan air maka semakin besar pula torsi mekanik yang dihasilkan serta kenaikan kurva torsi mekanik turbin naik secara eksponensial. Terlihat bahwa nilai torsi mekanik terbesar adalah 2741,5 Nm pada kecepatan aliran air sebesar 3 m/detik. Nilai torsi mekanik

yang dihasilkan oleh turbin pada *pitch angle* 0° adalah yang paling tinggi dibandingkan dengan yang lainnya.

4.2 Torsi Turbin Hidro-kinetik pada *pitch angle* 5 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/detik

Grafik respon pemodelan Simulink pada sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan *pitch angle* turbin sebesar 5° dengan kecepatan air yang mengenai turbin antara 0-3 m/detik ditunjukkan oleh gambar berikut ini dengan torsi pada sumbu Y dan kecepatan air pada sumbu X.

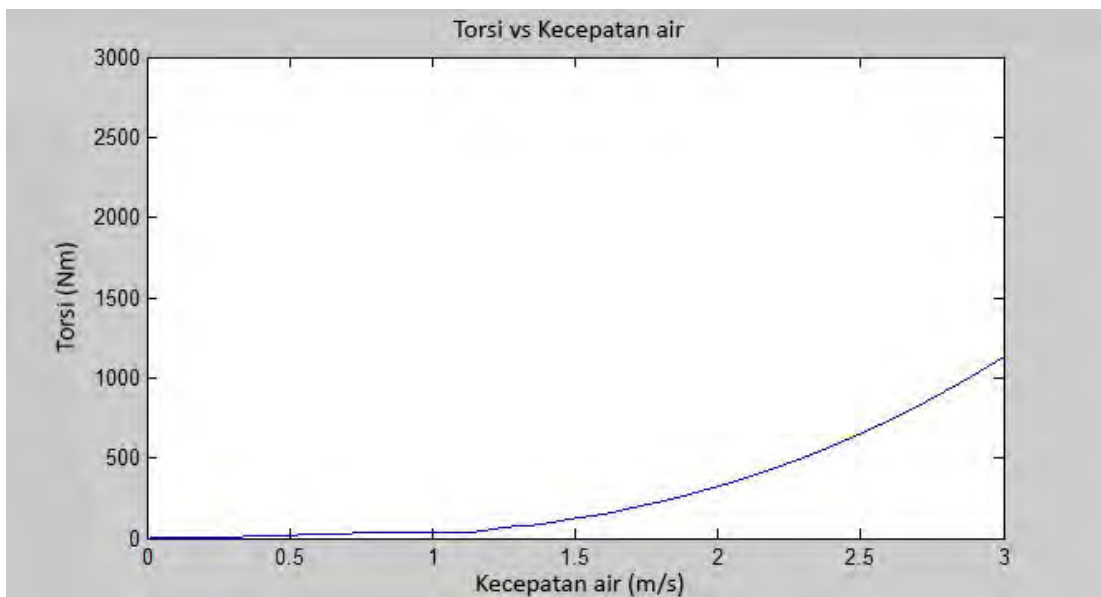


Gambar 4.2 Torsi turbin hidro-kinetik pada *pitch angle* 5 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik

Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa karakteristik kenaikan grafik torsi terhadap kecepatan air hampir sama dengan grafik pada kondisi turbin dengan *pitch angle* lainnya. Terlihat nilai maksimum torsi turbin yang dihasilkan hanya sebesar 770 Nm pada kecepatan air sebesar 3 m/detik. Nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin dengan *pitch angle* 5° adalah yang terkecil dibandingkan dengan yang lainnya.

4.3 Torsi Turbin Hidro-kinetik pada *pitch angle* 10 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/detik

Grafik respon pemodelan Simulink pada sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan *pitch angle* turbin sebesar 10° dengan kecepatan air yang mengenai turbin antara 0-3 m/detik ditunjukkan oleh gambar berikut ini dengan torsi pada sumbu Y dan kecepatan air pada sumbu X.



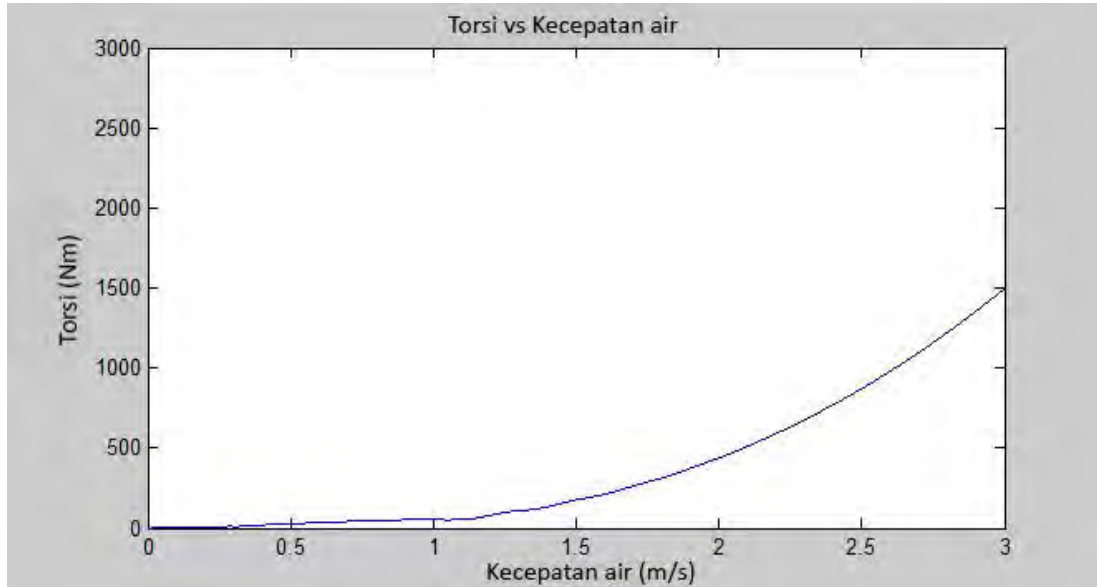
Gambar 4.3 Torsi turbin hidro-kinetik pada *pitch angle* 10 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik

Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa karakteristik kenaikan grafik torsi terhadap kecepatan air hampir sama dengan grafik pada kondisi turbin dengan *pitch angle* lainnya. Kemudian nilai torsi yang dihasilkan adalah sebesar 1227,4 Nm pada kecepatan air sebesar 3 m/detik.

4.4 Torsi Turbin Hidro-kinetik pada *pitch angle* 15 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/detik

Grafik respon pemodelan Simulink pada sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan *pitch angle* turbin sebesar 15° dengan kecepatan air yang mengenai turbin antara 0-3 m/detik

ditunjukkan oleh gambar berikut ini dengan torsi pada sumbu Y dan kecepatan air pada sumbu X.

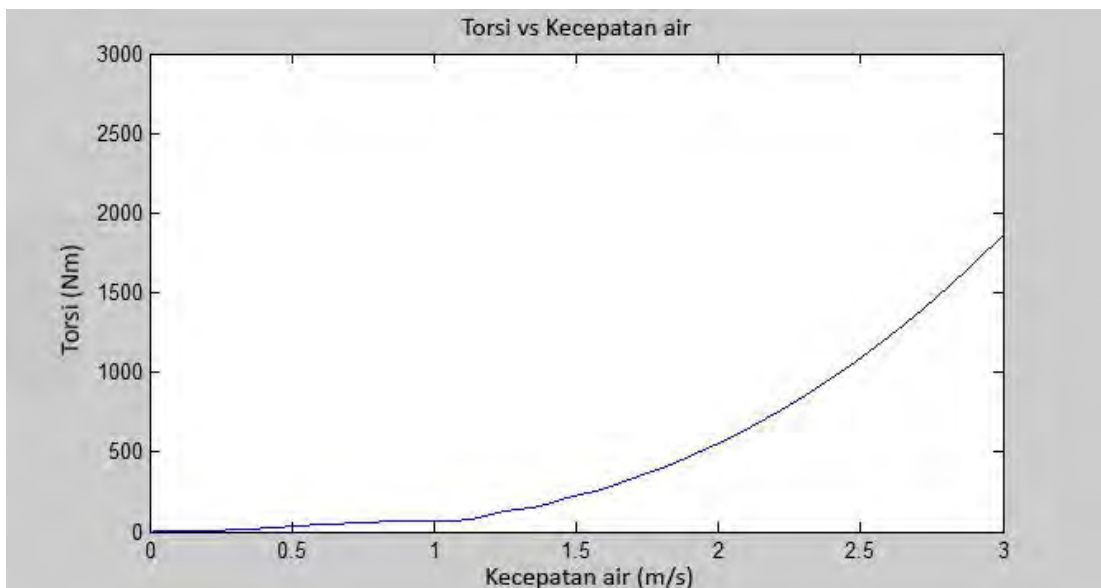


Gambar 4.4 Torsi turbin hidro-kinetik pada *pitch angle* 15 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa karakteristik kenaikan grafik torsi terhadap kecepatan air hampir sama dengan grafik pada kondisi turbin dengan *pitch angle* lainnya. Kemudian nilai torsi yang dihasilkan adalah sebesar 1492,5 Nm pada kecepatan air sebesar 3 m/detik.

4.5 Torsi Turbin Hidro-kinetik pada *pitch angle* 20 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/detik

Grafik respon pemodelan Simulink pada sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan *pitch angle* turbin sebesar 20° dengan kecepatan air yang mengenai turbin antara 0-3 m/detik ditunjukkan oleh gambar berikut ini dengan torsi pada sumbu Y dan kecepatan air pada sumbu X.

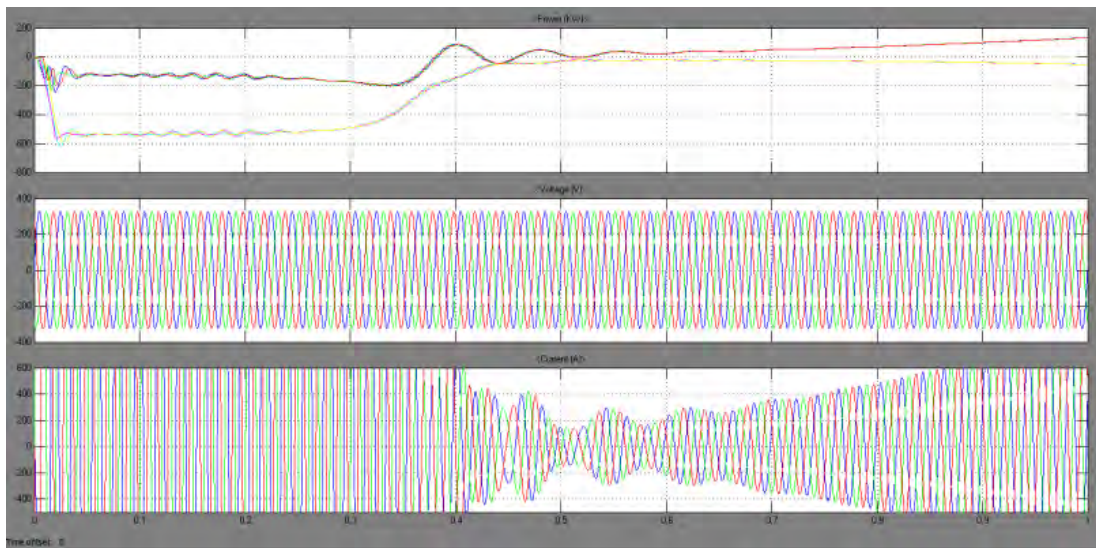


Gambar 4.5 Torsi turbin hidro-kinetik pada *pitch angle* 20 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa karakteristik kenaikan grafik torsi terhadap kecepatan air hampir sama dengan grafik pada kondisi turbin dengan *pitch angle* lainnya. Kemudian nilai torsi yang dihasilkan adalah sebesar 1857,2 Nm pada kecepatan air sebesar 3 m/detik.

4.6 Daya, Tegangan dan Arus Generator Induksi pada Turbin Hidro-kinetik dengan *pitch angle* 0 Derajat pada Kecepatan Air 0-3 m/detik

Grafik keluaran daya aktif, daya reaktif, tegangan tiga fasa dan arus tiga fasa yang dihasilkan oleh generator induksi pada pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan *pitch angle* turbin sebesar 0° adalah sebagai berikut.



Gambar 4.6 Daya, tegangan dan arus generator induksi pada turbin hidro-kinetik dengan *pitch angle* 0 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik

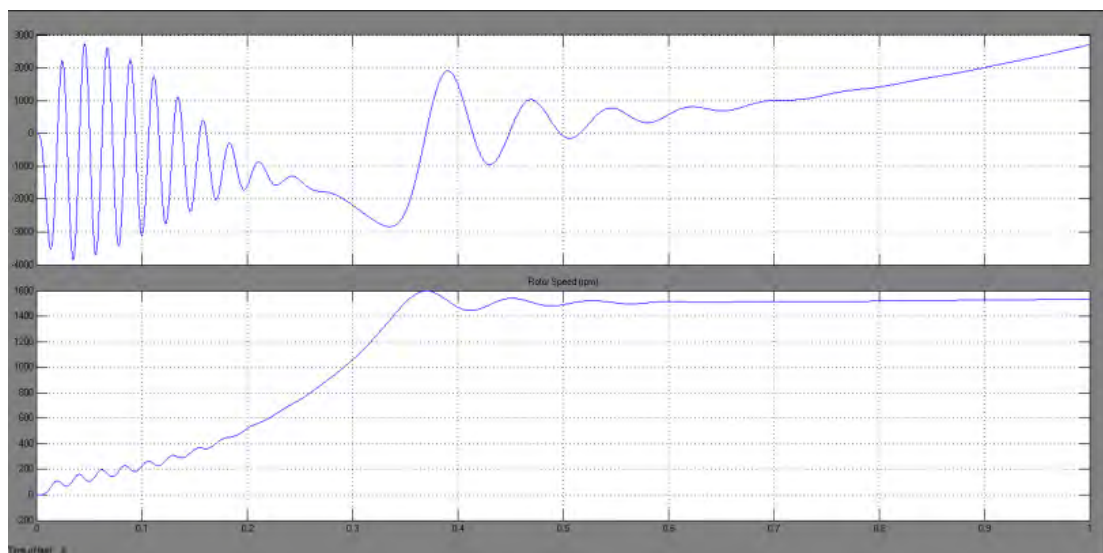
Pada Gambar 4.6 terlihat bahwa keluaran daya aktif dan reaktif dalam bentuk grafik rms (*root mean square*) dalam satuan kW. Daya aktif mulai mengalami kenaikan pada $t = 0,35$ detik atau ketika kecepatan air sebesar 1 m/detik dan torsi mekanik yang dihasilkan oleh turbin sebesar 115,5 Nm. Maksimum *overshoot* daya aktif yang dihasilkan adalah sebesar 83 kW ketika $t = 0,4$ detik atau ketika kecepatan air sebesar 1,2 m/detik dan torsi mekanik yang dihasilkan oleh turbin sebesar 181,6 Nm. Daya aktif mulai bergerak stabil pada $t = 0,66$ detik atau ketika kecepatan air sebesar 1,9 m/detik dan torsi mekanik yang dihasilkan turbin sebesar 828,5 Nm. Maksimum daya aktif yang dihasilkan adalah sebesar 132,5 kW pada saat kecepatan air maksimal yaitu 3 m/detik dengan torsi yang dihasilkan oleh turbin sebesar 2741,5 Nm.

Pada Gambar 4.6 terlihat daya reaktif digambarkan dengan kurva yang berada di bawah daya aktif. Daya reaktif mulai mengalami kenaikan pada $t = 0,26$ detik atau pada kecepatan air 0,78 m/detik dan torsi mekanik sebesar 100 Nm. Daya reaktif mulai bergerak turun secara perlahan seiring dengan kenaikan daya aktif pada $t = 0,6$ detik atau pada kecepatan air 1,8 m/detik.

Pada Gambar 4.6 terlihat tegangan yang dihasilkan adalah sebesar 326,5 V tiga fasa dengan frekuensi 50 Hz. Tegangan yang dihasilkan oleh generator sudah sangat stabil. Hal tersebut terlihat dari sinyal sinus tegangan yang terbentuk sudah sangat sempurna. Kemudian pada grafik arus listrik terlihat sinyal arus listrik mulai stabil pada $t = 0,6$ detik dengan nilai sebesar 140 A yakni saat kecepatan air sebesar 1,8 m/s atau torsi mekanik sebesar 620,4 Nm. Setelah itu sinyal arus listrik bergerak naik seiring dengan bertambahnya kecepatan air hingga mencapai titik maksimum sebesar 900 A pada kecepatan air sebesar 3 m/detik.

4.7 *Electromagnetic Torque* dan Kecepatan Rotasi Generator Induksi pada Turbin Hidro-kinetik dengan *pitch angle* 0 Derajat pada Kecepatan Air 0-3m/detik

Grafik keluaran torsi elektrik dan kecepatan rotasi generator induksi pada pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik dengan *pitch angle* turbin sebesar 0° dengan kecepatan air 1-3 m/detik adalah sebagai berikut.

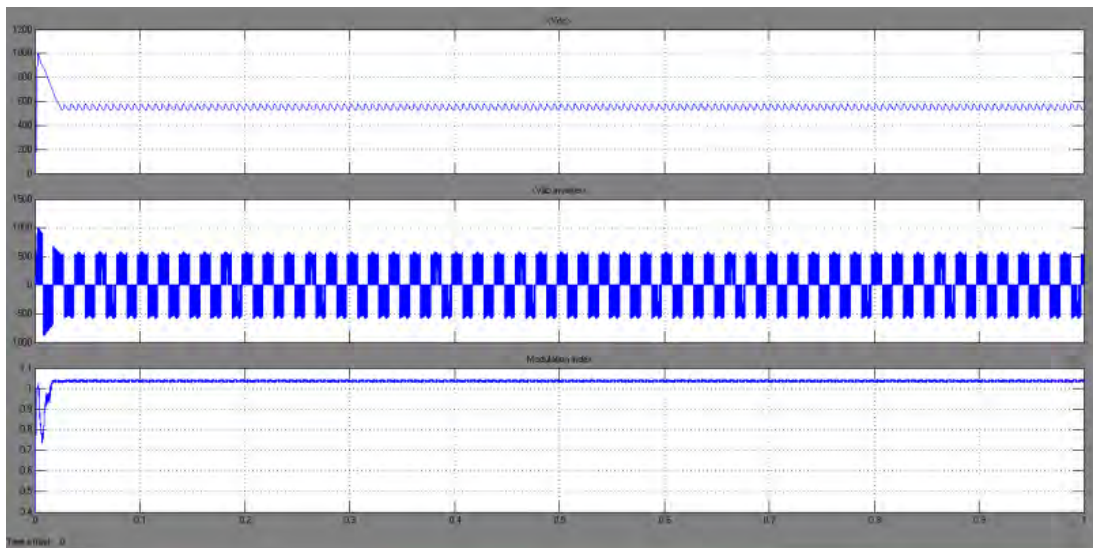


Gambar 4.7 *Electromagnetic torque* dan kecepatan rotasi generator induksi pada turbin hidro-kinetik dengan *pitch angle* 0 derajat pada kecepatan air 0-3m/detik

Terlihat pada Gambar 4.7 torsi elektrik dari generator induksi mulai stabil pada $t = 0,79$ detik. Kondisi ini terjadi saat generator mencapai kestabilan pada kecepatan sinkronisasinya yaitu sebesar 1520 rpm dan kecepatan air sebesar 2,37 m/detik. Sedangkan untuk torsi elektrik yang dihasilkan oleh generator adalah sebesar 2703 Nm.

4.8 Tegangan DC, Tenggangan *Inverter* dan *Modulation Indeks* pada DC-AC *Inverter*

Berikut adalah grafik keluaran tegangan DC, tegangan inverter dan *modulation indeks* pada DC-AC *inverter* pada pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik.

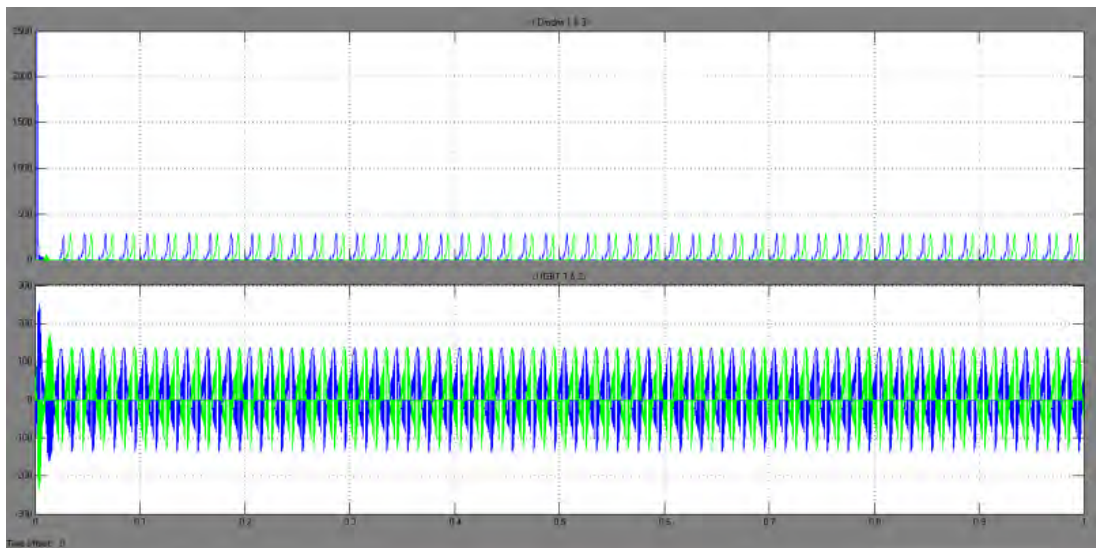


Gambar 4.8 Tegangan DC, tengangan *inverter* dan *modulation indeks* pada DC-AC *inverter*

Pada Gambar 4.8 terlihat bahwa setelah $t = 0,026$ detik sistem mencapai kondisi stabil. Terlihat DC-AC *inverter* mengalami modulasi yang berlebihan sebab nilai $m > 1$. Sedangkan *inverter* pada kondisi normal mempunyai nilai $0 < m < 1$. Kemudian grafik baris kedua menunjukkan kondisi sinyal keluaran IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

4.9 Arus pada Diode 1-3 dan IGBT 1-2 pada DC-AC *Inverter*

Berikut ini adalah grafik keluaran arus pada diode 1-3 dan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) pada DC-AC *Inverter*.

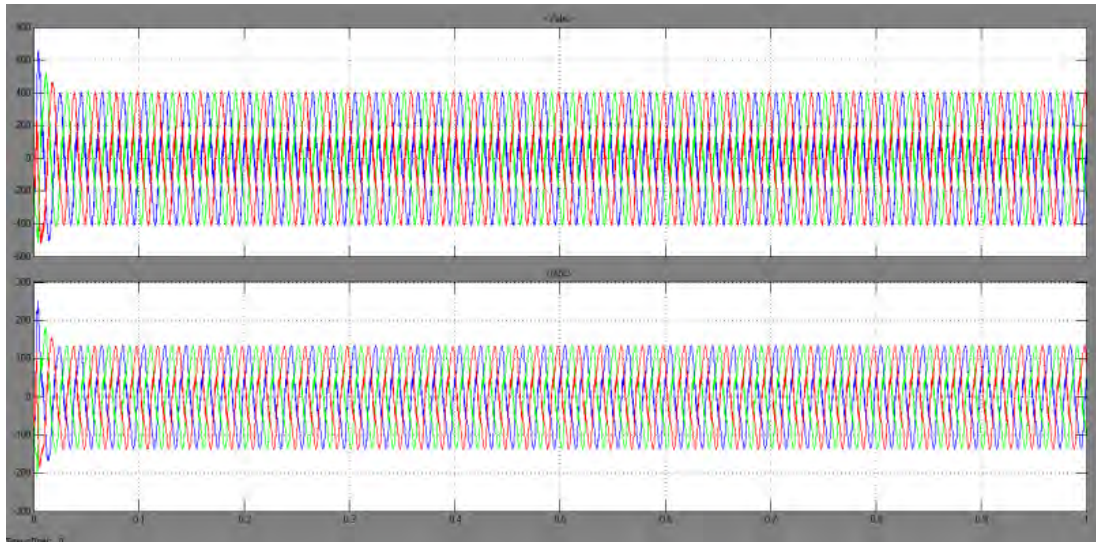


Gambar 4.9 Arus pada diode 1-3 dan IGBT 1-2 pada DC-AC *inverter*

Pada Gambar 4.9 terlihat sinyal arus pada diode 1-3 mencapai kondisi stabil ketika $t=0,05$ detik. Kondisi tersebut diikuti juga dengan sinyal pada transistor IGBT 1-2. Sedangkan besarnya arus rata-rata pada Diode 1-3 adalah sebesar 287 A dan pada transistor IGBT adalah 137,5 A. Terlihat grafik keluaran IGBT 1-2 mempunyai sinyal yang belum sempurna. Oleh karena itu dibutuhkan rangkaian filter agar didapatkan sinyal sinus yang sempurna.

4.10 Tegangan Tiga Fasa (V_{ABC}) dan Arus Tiga Fasa (I_{ABC}) pada DC-AC *Inverter*

Berikut adalah grafik keluaran tegangan tiga fasa (V_{ABC}) dan arus tiga fasa (I_{ABC}) pada DC-AC *inverter*.

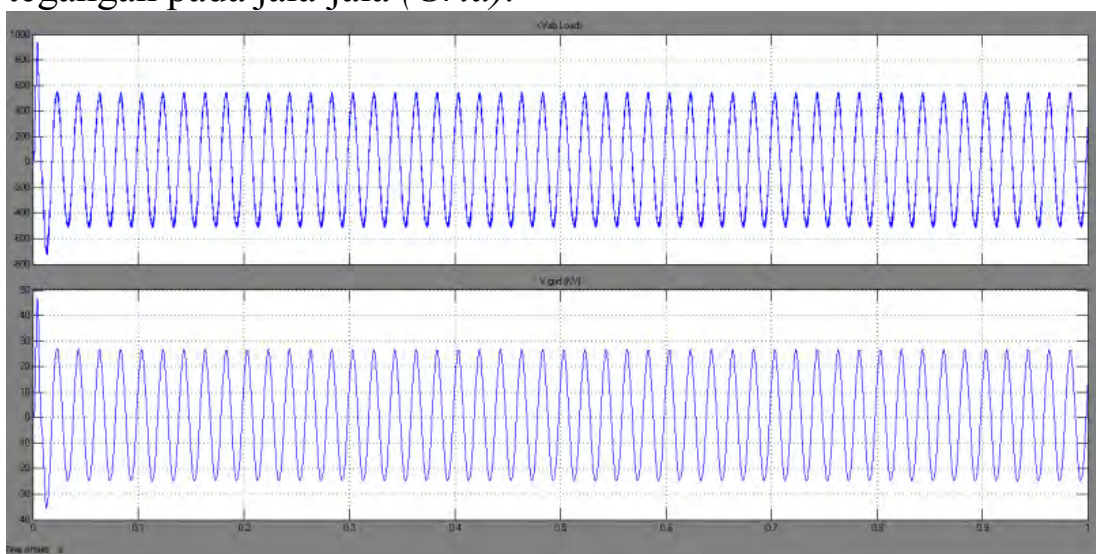


Gambar 4.10 Tegangan tiga fasa (V_{ABC}) dan arus tiga fasa (I_{ABC}) pada DC-AC *inverter*

Gambar 4.10 menunjukkan tegangan tiga fasa dan arus tiga fasa keluaran DC-AC *inverter*. Terlihat tegangan dan arus yang dihasilkan oleh DC-AC *inverter* adalah sebesar 400 V dan 134 A. Sedangkan untuk frekuensinya adalah sebesar 50 Hz.

4.11 Tegangan *Output Inverter* (V_{AB}) dan Tegangan pada Jala-jala (*Grid*)

Berikut adalah grafik keluaran tegangan *output inverter* dan tegangan pada jala-jala (*Grid*).



Gambar 4.11 Tegangan *output inverter* (V_{AB}) dan tegangan pada jala-jala (*grid*)

Terlihat pada Gambar 4.11 Tegangan maksimum output inverter adalah mencapai 550 V dan Tegangan maksimum pada jala-jala (*grid*) adalah 26,5 kV.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari pengujian dan analisis yang telah dilakukan pada pengerjaan tugas akhir ini diperoleh beberapa kesimpulan, antara lain:

- a. Hasil pengujian pemodelan dengan Simulink menunjukkan bahwa *pitch angle* 0^0 merupakan *pitch angle* yang paling maksimal karena menghasilkan torsi mekanik turbin hidro-kinetik terbesar, yaitu 2741,5 Nm.
- b. Nilai *pitch angle* 0^0 menghasilkan daya elektrik pada generator induksi sebesar 132,5 kW, tegangan tiga fasa 326,5 V dengan frekuensi 50 Hz, arus listrik 900 A, rotasi rotor pada generator 1520 rpm dan torsi elektrik 2703 Nm. Besarnya efisiensi sistem PLTH adalah sebesar 49,97%.
- c. DC-AC *inverter* pada pemodelan pembangkit listrik menghasilkan tegangan tiga fasa 400 V dan arus 134 A dengan frekuensi 50 Hz serta *modulation indeks* 1,04.
- d. Energi listrik yang dihasilkan sistem pembangkit listrik tenaga hidro-kinetik ini dapat digunakan untuk memenuhi konsumsi energi listrik di lingkungan PLTU ataupun dihubungkan dengan jala-jala (*grid*).

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah dengan menambahkan analisa pemodelan turbin hidro-kinetik menggunakan software CFD (Computational Fluid Dynamics) untuk mengetahui unjuk-kerja turbin dan profil aliran disekitar turbin.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Li Wang et al., "A Micro Hydro Power Generation System for Sustainable Microgrid Development in Rural Electrification of Africa," *IEEE*, 2009.
- [2] Herman Jacobus Vermaak, Kanzumba Kusakana, and Philip Sandile Koko, "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications A review of literature," *Elsevier*, vol. 29, pp. 625-633, September 2014.
- [3] C.S. Sharma and Tali Nagwani, "Simulation and Analysis of PWM Inverter Fed Induction Motor Drive," *IJSETR*, vol. 2, no. 2, pp. 359-366, February 2013.
- [4] Mohammad Shahsavarifard, Eric L Bibeau, and Amir Hossein Birjandi, "Performance gain of a horizontal axis hydrokinetic turbine using shroud," *MTS*, 2013.
- [5] Erna Septyaningrum, *Analisis Profil Wake di belakang Turbin Arus Laut Tipe V-Blade Darrieus Berbasis CFD*. Surabaya, 2015.
- [6] R Norizi, M Vahidzadeh, and A Riasi, "Design, analysis and predicting hydrokinetic performance of a horizontal marine current axial turbine by consideration of turbine installation depth," vol. 108, 2015.
- [7] R Niptro et al., *Kondensor*. Pekanbaru, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik: Universitas Riau, 2013.
- [8] P K Nag, *Power Plant Engineering*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
- [9] Sattouf Mousa, "Simulation Model of Hydro Power Plant Using MatlabSimulink," vol. 4, no. 1, 2014.
- [10] Moniruzzaman Md, "Effect of Pitch Angle on the Performance of Horizontal Effect of Pitch Angle on the Performance of Horizontal Axis Hydrokinetic Turbine for River Application," *Proceedings of 10th Global Engineering*,

Science and Technology Conference, January 2015.

- [11] Jasmin Martinez, "Modelling and Control of Wind Turbines," *Imperial College London*, September 2007.

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di kota Jombang, 4 September 1992. Penulis menempuh pendidikan di SDN Pucangsimo I lulus tahun 2005, SMPN 2 Jombang lulus tahun 2008, dan SMAN 2 Jombang lulus tahun 2011. Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Fisika ITS melalui jalur SNMPTN 2012. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi kemahasiswaan GMS (Gerakan Mahasiswa Surabaya) selama periode 2013 - 2014 dan menjabat sebagai Ketua I. penulis juga aktif dalam kegiatan sosial sebagai relawan di RBGM (Rumah Baca Gang Masjid) Jombang selama periode 2012-2016. Penulis mempunyai pengalaman *internship program* selama 1 bulan di PT. Chevron Pacific Indonesia. Bidang minat penulis adalah energi terbarukan, rekayasa energi, dan pengkondisian lingkungan. Penulis dapat dihubungi melalui email faridhulikhsan@gmail.com.